

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS DIESEL-BIODIESEL
ORIENTADAS A DISMINUIR LAS EMISIONES CONTAMINANTES
PROVOCADAS POR FUENTES MÓVILES**

**TESIS DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

AUTORA: LYANNE STEPHANIE VALENCIA BALAREZO

QUITO

2013

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS DIESEL-BIODIESEL
ORIENTADAS A DISMINUIR LAS EMISIONES CONTAMINANTES
PROVOCADAS POR FUENTES MÓVILES**

**TESIS DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

AUTORA: LYANNE STEPHANIE VALENCIA BALAREZO

TUTOR: ING. PABLO HERNÁN PAREDES MEYTHALER

QUITO

2013

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de Tutor de la tesis de grado: CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS DIESEL-BIODIESEL ORIENTADAS A DISMINUIR LAS EMISIONES CONTAMINANTES PROVOCADAS POR FUENTES MÓVILES, presentado y desarrollado por la señorita: VALENCIA BALAREZO LYANNE STEPHANIE, previo a la obtención del Título de INGENIERA QUÍMICA, considero que la tesis reúne los requisitos necesarios.

En la ciudad de Quito, a los 10 días del mes de Octubre de 2013.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Pablo Paredes Meythaler', written over a horizontal line.

Ing. Pablo Hernán Paredes Meythaler

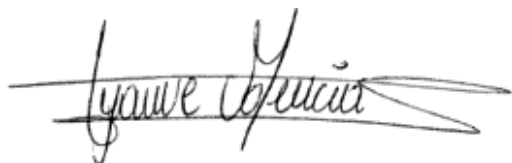
PROFESOR TUTOR

AUTORIZACIÓN DE LA AUTORÍA INTELECTUAL

Yo, LYANNE STEPHANIE VALENCIA BALAREZO, en calidad de autora de la tesis realizada sobre CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS DIESEL-BIODIESEL ORIENTADAS A DISMINUIR LAS EMISIONES CONTAMINANTES PROVOCADAS POR FUENTES MÓVILES, por la presente autorizo a la UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR, hacer el uso de todos los contenidos que me pertenecen o de parte de los que contiene esta tesis, con fines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autor me corresponden, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8, 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

En la ciudad de Quito, a los 10 días del mes de Octubre de 2013.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Lyanne Valencia', with a long horizontal stroke extending to the right.

Lyanne Stephanie Valencia Balarezo

C.C. 100332663-2

lbalarezo15@gmail.com

DEDICATORIA

A ti papi, Sergio Valencia, por el ejemplo de perseverancia, rectitud y constancia que lo caracterizan y que me ha inculcado siempre, porque sé que está orgulloso de la persona en la cual me he convertido. Gracias por creer en mí y por haberme apoyado siempre en cada decisión tomada, por sus consejos, sus valores, por la motivación que me ha permitido ser una persona de bien, por celebrar mis logros pero más que nada, por su paciencia y amor.

A ti mami, Isabel Balarezo, mi mejor amiga, por ser el pilar más importante en mi vida y por demostrarme siempre su cariño, confianza y apoyo incondicional, corrigiendo mis faltas y celebrando mis triunfos. Por enseñarme a no desfallecer ni rendirme ante nada y siempre perseverar a través de sus sabios consejos. Gracias por ser una madre ejemplar y por tu infinito amor.

A ti hermano, Stephen Valencia, la herencia más valiosa de mis padres, porque quiero ser tu ejemplo a seguir. Gracias por estar presente siempre en cada paso que doy, por acompañarme en los momentos difíciles de mi vida, por disfrutar junto a mí cada alegría. Por ser mi motivación, inspiración y felicidad, fomentando en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida.

Lyanne

AGRADECIMIENTOS

Con toda la humildad que mi corazón puede emanar, dedico mi trabajo primeramente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. Por guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.

A mi familia, por haberme dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos. Porque el orgullo que sienten por mí, es la fuerza que necesito para cumplir mis metas. Gracias por su amor, trabajo y sacrificio. Ustedes son mi más grande bendición.

A la Universidad Central del Ecuador, a mi tan querida Facultad de Ingeniería Química y a aquellas autoridades y profesores que marcaron cada etapa de mi camino universitario, gracias por su tiempo, apoyo y sabiduría que me transmitieron en el desarrollo de mi formación profesional.

A la Empresa Palmar del Río y al Ing. Roberto Manzano por haberme permitido utilizar las instalaciones del laboratorio y planta extractora para la obtención del biocombustible, por la valiosa información y conocimiento impartido.

A la Secretaría de Ambiente y al señor Ing. Jorge Kaslin por su espíritu de colaboración desinteresada y la buena predisposición, al aportar con su conocimiento y facilitarme los equipos necesarios para realizar la medición de emisiones contaminantes.

Al Señor, Dr. Juan Enrique Tacoronte, quién con sus conocimientos, sus orientaciones, su manera de trabajar y su motivación me supo guiar hasta la culminación del presente trabajo.

Al tutor, Ing. Pablo Paredes Meythaler por su esfuerzo y dedicación, su persistencia, su paciencia que han sido fundamentales para la culminación de la tesis. De igual forma a los señores revisores, Ing. Luis Calle e Ing. Andrés De La Rosa quienes han contribuido con la mejora del mismo.

CONTENIDO

	pág.
LISTAS DE TABLAS	xiii
LISTAS DE GRÁFICOS	xvi
LISTA DE FIGURAS.....	xvii
LISTA DE ANEXOS.....	xviii
RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN	3
 1. BIODIESEL	 5
1.1 Definición de biodiesel.....	5
1.2 Materias primas para la obtención de biodiesel	5
1.3 Reacción de obtención del biodiesel.....	6
1.3.1 <i>Mecanismo de reacción para la obtención de biodiesel.</i>	6
1.4 Características del biodiesel	8
1.5 Especificaciones para el biodiesel	8
1.5.1 <i>Norma EN 14214:2008. Especificación para biodiesel.</i>	8
1.5.2 <i>Norma ASTM D 6751:2012. Especificación estándar para mezclas de combustible biodiesel (B100) para los combustibles destilados medios.</i>	8
1.5.3 <i>Norma NTE INEN 2482:2009. Requisitos biodiesel.</i>	9
1.6 Experiencia internacional del uso de biodiesel como combustible	9
1.7 Situación actual de producción de biodiesel en Ecuador	11

1.8 Producción de biodiesel en La Fabril	11
1.9 Producción de biodiesel en Palmar del Río	12
2. DIESEL.....	13
2.1 Definición de diesel.....	13
2.2 Proceso de obtención del diesel.....	13
2.3 Especificaciones para el diesel	13
2.4 Diesel a nivel mundial	15
2.5 Diesel en Ecuador.....	16
3. MOTOR DIESEL.....	17
3.1 Definición de motor diesel	17
3.2 Funcionamiento del motor diesel	17
3.3 Proceso de combustión en motores a diesel.....	18
3.3.1 <i>Compresión, proceso 1-2</i>	18
3.3.2 <i>Combustión, proceso 2-3</i>	18
3.3.3 <i>Explosión/Expansión, proceso 3-4</i>	18
3.3.4 <i>Escape, proceso 4-1</i>	18
3.4 Química de combustión.....	19
3.5 Factores que influyen en la combustión	19
3.5.1 <i>Combustible</i>	19
3.5.2 <i>Combustión</i>	19
3.5.3 <i>Energía</i>	19
4. MEZCLAS DIESEL-BIODIESEL.....	20
4.1 Mezclas diesel-biodiesel como combustible.....	20
4.2 Especificaciones para mezclas diesel-biodiesel	20

4.3 Experiencia en Ecuador acerca del uso de mezclas diesel-biodiesel como combustible y abastecimiento de la demanda nacional.....	20
5. EMISIONES CONTAMINANTES PROVOCADAS POR FUENTES MÓVILES	22
5.1 Contaminantes generados por la combustión del diesel.....	22
5.1.1 Dióxido de Carbono	22
5.1.2 Monóxido de Carbono.....	22
5.1.3 Dióxido de azufre.	23
5.1.4 Óxidos de Nitrógeno.....	23
5.1.5 Material particulado	23
5.2 Efectos de las emisiones contaminantes	23
5.3 Métodos para medir los gases emitidos para fuentes móviles con motor a diesel.....	24
5.3.1 Norma NTE INEN 2202:2000. Gestión Ambiental. Aire. Vehículos automotores. Determinación de la opacidad de emisiones de escape de motores a diesel mediante la prueba estática. Método de aceleración libre..	24
5.3.2 Norma NTE INEN 2207:2002. Gestión Ambiental. Aire. Vehículos automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de diesel.....	24
5.3.3 Sensores de variación infrarroja.....	24
5.3.4 Equipo OEM 2100 MONTANA..	24
6. PRUEBAS ESTADÍSTICAS DE SIGNIFICANCIA.....	25
6.1 Prueba-t.....	25
6.2 Prueba -F.....	26
6.3 Análisis de la varianza (ANOVA).....	26
6.3.1 Conceptos y parámetros utilizados en ANOVA	27
7. PARTE EXPERIMENTAL.....	28
7.1 Obtención de biodiesel en Palmar del Río.....	28

7.1.1 Materiales y Equipos para la obtención de biodiesel	28
7.1.2 Sustancias y Reactivos para la obtención de biodiesel	29
7.1.3 Procedimiento para la obtención de aceite y biodiesel	29
7.1.3.1 Obtención del aceite rojo de palma africana <i>Elaeis oleifera</i> x <i>Elaeis guineensis</i>	29
7.1.3.2 Obtención de biodiesel..	29
7.1.4 Datos teóricos para la obtención de biodiesel.....	30
7.1.5 Datos experimentales para la obtención de biodiesel	31
7.1.6 Cálculos para la obtención de biodiesel.....	32
7.2 Caracterización de muestras	35
7.2.1 Procedimientos de los ensayos para la caracterización de las diferentes muestras	35
7.2.2 Caracterización mediante cromatografía gaseosa de la materia prima (aceite rojo de palma africana de <i>Elaeis oleifera</i> x <i>Elaeis guineensis</i> (OxG) de Palmar del Río).....	39
7.2.3 Caracterización del biodiesel (B100).....	41
7.2.4 Caracterización del diesel premium	44
7.2.5 Caracterización de mezclas diesel-biodiesel..	45
7.2.5.1 Caracterización de mezclas diesel-biodiesel (La Fabril)	46
7.2.5.2 Caracterización de mezclas diesel-biodiesel (Palmar del Río)	49
7.3 Emisiones contaminantes	52
7.3.1 Características del vehículo	52
7.3.2 Características del equipo OEM 2100 MONTANA..	52
7.3.3 Procedimiento para utilizar el equipo OEM 2100 MONTANA	53
7.3.4 Datos obtenidos de las emisiones contaminantes.	54
7.3.5 Análisis estadístico de los datos de emisiones contaminantes..	62
7.3.5.1 Cálculos estadísticos para las pruebas de significación.....	62
7.3.5.1.1 Prueba-t	62
7.3.5.1.2 Prueba-F	66
7.3.5.2 Resultados de las pruebas de significación	72

7.3.6 Análisis de la reducción de emisiones contaminantes de la mezcla B5LF (5% volumen de biodiesel de La Fabril) con respecto al diesel premium.....	77
7.3.6.1 Cálculo modelo para determinar la disminución de emisiones contaminantes utilizando la mezcla B5LF con respecto al diesel premium.....	77
8. CÁLCULOS.....	82
8.1 Cálculo modelo para la caracterización del Biodiesel de La Fabril	82
8.1.1 Cálculo de la densidad a 15,6 °C (60°F) según la norma ASTM D 287.....	82
8.1.2 Cálculo del punto de inflamación según la Norma ASTM D 93	85
8.1.3 Cálculo del contenido de agua según la Norma ASTM D 95.....	86
8.1.4 Cálculo de la viscosidad cinemática según la Norma ASTM D 445.....	87
8.1.5 Cálculo del Número de Cetano según la Norma ASTM D 976.....	89
8.1.6 Cálculo de la temperatura de ebullición al 90% de destilado según la Norma ASTM D86	91
8.2 Resultados totales de los cálculos realizados.....	92
9. ANALISIS DE RESULTADOS.....	93
9.1 Significado de los ensayos aplicados.....	93
9.2 Análisis del estudio cromatográfico de las muestras	95
9.2.1 Comparación cromatográfica del Aceite rojo de palma – Biodiesel La Fabril (BLF) – Biodiesel Palmar del Río (BPDR).....	95
9.2.2 Comparación cromatográfica del Diesel Premium (DP) – Biodiesel La Fabril (BLF) – Biodiesel Palmar del Río (BPDR).....	96
9.2.3 Comparación cromatográfica del Diesel Premium (DP) – Biodiesel La Fabril (BLF) – Mezcla B5LF	97
9.2.4 Comparación cromatográfica del Diesel Premium (DP) – Biodiesel Palmar del Río (BPDR) – Mezcla B5PDR	98

9.3 Análisis de las emisiones contaminantes provocadas por las diferentes muestras analizadas	99
9.3.1 Comparación de emisiones de NO _x (ppm)	99
9.3.2 Comparación de emisiones de HC (ppm)	100
9.3.3 Comparación de emisiones de CO (%).....	101
9.3.4 Comparación de emisiones de CO ₂ (%)	102
9.3.5 Comparación de emisiones de PM (mg/m ³).....	103
10. DISCUSIÓN	104
11. CONCLUSIONES	106
12. RECOMENDACIONES	109
CITAS BIBLIOGRÁFICAS	111
BIBLIOGRAFÍA	113
ANEXOS	117

LISTAS DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Norma NTE INEN 2482-2009. Requisitos biodiesel.....	9
Tabla 2. Norma NTE INEN 1489:2012. Requisitos del diesel No. 1	14
Tabla 3. Norma NTE INEN 1489:2012. Requisitos del diesel No. 2	14
Tabla 4. Norma NTE INEN 1489:2012. Requisitos del diesel Premium.....	15
Tabla 5. Norma ASTM D7467-10. Especificación estándar para Diesel. Biodiesel Mezcla (B6 a B20).....	20
Tabla 6. Parámetros utilizados en ANOVA.....	27
Tabla 7. Definición de variables para la obtención del biodiesel en Palmar del Río	30
Tabla 8. Datos teóricos para la obtención de biodiesel.....	31
Tabla 9. Datos Experimentales para la obtención del biodiesel en Palmar del Río	31
Tabla 10. Procedimientos de los ensayos para la caracterización de muestras	35
Tabla 11. Composición química del aceite de palma africana OxG.....	39
Tabla 12. Zonas del cromatograma del aceite rojo de palma africana	40
Tabla 13. Caracterización del biodiesel de La Fabril y Palmar del Río de acuerdo a la Norma NTE INEN 2482-2009	41
Tabla 14. Caracterización del diesel premium (DP) de acuerdo a la Norma NTE INEN 1489:2012	44
Tabla 15. Caracterización de mezclas B2, B5 (LF). Según la Norma NTE INEN 1489:2012.....	46
Tabla 16. Caracterización de mezclas B8, B10, B15 (LF). Según la Norma ASTM D7467-10.	48
Tabla 17. Caracterización de mezclas B2, B5 (PDR). Según la Norma NTE INEN 1489:2012.....	49
Tabla 18. Caracterización de mezclas B8, B10, B15 (PDR). Según la Norma ASTM D7467-10.	51

Tabla 19. Características del vehículo para medir emisiones contaminantes.....	52
Tabla 20. Características del equipo OEM 2100 MONTANA para medir emisiones contaminantes	53
Tabla 21. Emisiones contaminantes del diesel premium (DP).....	55
Tabla 22. Emisiones contaminantes del biodiesel de La Fabril (BLF).....	56
Tabla 23. Emisiones contaminantes de la mezcla B5LF.....	57
Tabla 24. Emisiones contaminantes de la mezcla B10LF.....	58
Tabla 25. Emisiones contaminantes del biodiesel de Palmar del Río (BPDR).....	59
Tabla 26. Emisiones contaminantes de la mezcla B5PDR.....	60
Tabla 27. Emisiones contaminantes de la mezcla B10PDR.....	61
Tabla 28. Cálculo de la desviación estándar de las muestras	63
Tabla 29. Resultados de la Prueba-t suponiendo dos muestras si las varianzas son iguales.....	66
Tabla 30. Cálculo de la desviación estándar de las muestras para encontrar SS total y SSE	69
Tabla 31. Tabla de resultados ANOVA.....	71
Tabla 32. Resultados de la Prueba-F – ANOVA. Resumen.....	72
Tabla 33. Resultados de la Prueba-F – ANOVA. Análisis de varianza	72
Tabla 34. Resultados de las pruebas de significación para el diesel premium (DP).....	73
Tabla 35. Resultados de las pruebas de significación para el biodiesel de La Fabril (BLF).....	73
Tabla 36. Resultados de las pruebas de significación para la mezcla B5LF.....	74
Tabla 37. Resultados de las pruebas de significación para la mezcla B10LF.....	74
Tabla 38. Resultados de las pruebas de significación para el biodiesel de Palmar del Río (BPDR).....	75
Tabla 39. Resultados de las pruebas de significación para la mezcla B5PDR.....	75
Tabla 40. Resultados de las pruebas de significación para la mezcla B10PDR.....	76
Tabla 41. Reducción de emisiones contaminantes de la mezcla B5LF con respecto al diesel premium.....	80
Tabla 42. Definición de variables para determinar la densidad a 15,6°C (60°F)	82
Tabla 43. Datos experimentales para determinar la densidad a 15,6°C (60°F).....	83

Tabla 44. Datos consultados para determinar la densidad a 15,6°C (60°F).....	83
Tabla 45. Tabla de valores para la interpolación para determinar la densidad a 15,6°C (60°F)....	83
Tabla 46. Definición de variables para determinar el punto de inflamación	85
Tabla 47. Datos experimentales para determinar el punto de inflamación.....	85
Tabla 48. Definición de variables para determinar el contenido de agua.....	86
Tabla 49. Datos experimentales para determinar el contenido de agua	86
Tabla 50. Datos consultados para determinar el contenido de agua.....	86
Tabla 51. Definición de variables para determinar la viscosidad cinemática.....	87
Tabla 52. Datos experimentales para determinar la viscosidad cinemática	88
Tabla 53. Datos consultados para determinar la viscosidad cinemática.....	88
Tabla 54. Definición de variables para determinar el Número de Cetano.....	89
Tabla 55. Datos experimentales para determinar el Número de Cetano	89
Tabla 56. Datos consultados para determinar el Número de Cetano	90
Tabla 57. Definición de variables para determinar la Temperatura de ebullición al 90% de destilado	91
Tabla 58. Datos experimentales para determinar la Temperatura de ebullición al 90% de destilado	92
Tabla 59. Significado del ensayo aplicado	93

LISTAS DE GRÁFICOS

pág.

Gráfico 1. Volumen de metanol (V_m)= f (Volumen de aceite (V_a)).....	33
Gráfico 2. Peso del Hidróxido de Sodio (W_s)= f (Volumen de aceite (V_a)).....	34
Gráfico 3. Cromatograma del aceite rojo de palma africana. Señal= f (Tiempo de Retención)	40
Gráfico 4. Cromatograma del Biodiesel de La Fabril. Señal= f (Tiempo de retención)	42
Gráfico 5. Cromatograma del Biodiesel de Palmar del Río. Señal= f (Tiempo de retención)	43
Gráfico 6. Cromatograma del Diesel Premium. Señal= f (Tiempo de Retención)	45
Gráfico 7. Cromatograma de la mezcla B5LF. Señal= f (Tiempo de retención)	47
Gráfico 8. Cromatograma de la mezcla B5PDR. Señal= f (Tiempo de retención)	50
Gráfico 9. Comparación cromatográfica del Aceite rojo de palma – BLF – BPDR. Señal= f (Tiempo de retención)	95
Gráfico 10. Comparación cromatográfica del DP – BLF – BPDR. Señal= f (Tiempo de retención)	96
Gráfico 11. Comparación cromatográfica del DP – BLF – B5LF. Señal= f (Tiempo de retención)	97
Gráfico 12. Comparación cromatográfica del DP – BPDR – B5PDR. Señal= f (Tiempo de retención)	98
Gráfico 13. Comparación de emisiones de NO _x (ppm) = f (Tiempo(s)).....	99
Gráfico 14. Comparación de emisiones de HC (ppm) = f (Tiempo(s)).....	100
Gráfico 15. Comparación de emisiones de CO (%) = f (Tiempo(s)).....	101
Gráfico 16. Comparación de emisiones de CO ₂ (%) = f (Tiempo(s)).....	102
Gráfico 17. Comparación de emisiones de PM (mg/m ³) = f (Tiempo(s))	103

LISTAS DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Motor diesel de cuatro tiempos	17
Figura 2. Ciclo termodinámico Diesel.....	18
Figura 3. Emisiones contaminantes producidas por un vehículo	22

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Propiedades de los combustibles de ésteres	118
ANEXO B. Norma EN 14214-08. Especificación para biodiesel.....	119
ANEXO C. Norma ASTM D6751-12. Especificación estándar para mezclas de combustible biodiesel (B100) para los combustibles destilados medios	120
ANEXO D. Producción de biodiesel en el mundo	121
ANEXO E. Rendimiento de diferentes cultivos	122
ANEXO F. Obtención del aceite crudo seco de palma africana en La Fabril	123
ANEXO G. Obtención del aceite refinado en La Fabril	124
ANEXO H. Obtención del biodiesel en La Fabril	125
ANEXO J. Adopción de la especificación de bajo contenido de azufre	126
ANEXO K. Estimación oferta demanda de diesel automotriz en Ecuador	127
ANEXO L. Proyecciones introducción gradual de biodiesel en el Ecuador	128
ANEXO M. Obtención del aceite rojo de palma africana <i>Elaeis oleifera</i> x <i>Elaeis guineensis</i> (OxG).....	130
ANEXO N. Fotografías de la obtención del aceite rojo de palma africana <i>Elaeis oleifera</i> x <i>Elaeis guineensis</i> (OxG).....	131
ANEXO P. Obtención del biodiesel en Palmar del Río.....	132
ANEXO Q. Fotografías de la obtención del biodiesel en Palmar del Río.....	133
ANEXO R. Fotografías de equipos utilizados en los ensayos para la caracterización de las muestras	135

ANEXO S. Fotografías de implementos para medir emisiones contaminantes en una fuente móvil.....	137
ANEXO T. Valores críticos para la Distribución t de Student	138
ANEXO U. Valores críticos para la Distribución F en un nivel de significancia de 5%	139
ANEXO V. Determinación de la Densidad API corregida a 60°F. Biodiesel La Fabril	140
ANEXO W. Determinación del Índice de Cetano. Biodiesel La Fabril.....	141
ANEXO X. Resultados de los cálculos para la caracterización de las muestras	142
ANEXO Y. Representación comparativa de las diferentes propiedades con respecto a las distintas muestras analizadas.....	145

CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS DIESEL-BIODIESEL ORIENTADAS A DISMINUIR LAS EMISIONES CONTAMINANTES PROVOCADAS POR FUENTES MÓVILES

RESUMEN

Se caracterizaron mezclas diesel-biodiesel orientadas a disminuir las emisiones contaminantes en fuentes móviles. Para lo cual, con el biodiesel obtenido de manera artesanal, a partir de aceite de palma africana híbrida y con el biodiesel refinado de La Fabril, se prepararon mezclas al 2, 5, 8, 10 y 15% en volumen. Se efectuó la caracterización fisicoquímica de todas las muestras y en un motor a diesel se probaron los dos tipos de biodiesel, el diesel premium y las mezclas correspondientes al 5 y 10% en volumen de biodiesel. Se realizó un análisis estadístico de significancia con las concentraciones de los gases contaminantes emitidos en las respectivas pruebas.

Se concluye que la mezcla B5 (5% volumen de biodiesel de La Fabril) es la más adecuada para el consumo en fuentes móviles, ya que cumple con las especificaciones de la Norma NTE INEN 1489:2012 y permite una disminución en los gases de combustión, particularmente de los de hidrocarburos no combustionados (HC) en un 61%.

PALABRAS CLAVES: / BIODIESEL / DIESEL / MEZCLAS / CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA / GASES DE COMBUSTIÓN / FUENTES MÓVILES / CONTAMINACIÓN DEL AIRE /

CHARACTERIZATION OF DIESEL-BIODIESEL BLENDS ORIENTED REDUCE EMISSIONS CAUSED BY MOBILE SOURCES

ABSTRACT

Were characterized diesel - biodiesel blends designed to reduce emissions from mobile sources. To which, with the biodiesel obtained by traditional way, from hybrid palm oil and biodiesel refining of La Fabril, were prepared blends at 2, 5, 8, 10 and 15 % by volume. Was performed physicochemical characterization of all samples and in a diesel engine were tested the two types of biodiesel, the premium diesel and their corresponding blends to 5 and 10 % by volume of biodiesel. Was performed a statistical analysis of significance with the concentrations of the gaseous pollutants emitted in the respective tests.

We conclude that the B5 blend (5% volume of La Fabril's biodiesel) is most suitable for use in mobile sources, as it meets the specifications of the standard NTE INEN 1489:2012 and allows reduction in emissions, especially those of unburned hydrocarbons (HC) by 61%.

KEYWORDS: / BIODIESEL / DIESEL / BLENDS / CHARACTERIZATION
PHISICOCHEMICAL / COMBUSTION GASES / MOBILE SOURCES / AIR POLLUTION /

INTRODUCCIÓN

El mejorar la calidad de los combustibles que consume el sector automotor es una apuesta para controlar los riesgos ambientales y de salud que se presentan a diario.

Es por esto que, al utilizar mezclas diesel-biodiesel la dependencia del petróleo como único recurso energético disminuye, ya que el uso del biodiesel es mejor para el medio ambiente por producir menos emisiones contaminantes en comparación con el diesel, además está hecho a partir de recursos renovables, es menos tóxico y se biodegrada con más facilidad.

En este contexto, la utilización de mezclas diesel-biodiesel reducirían las emisiones contaminantes de Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂), Hidrocarburos (HC) y Óxido de Nitrógeno (NO_x); sin modificación en los motores, vehículos y maquinarias actuales.

La puesta en marcha del Plan de Mejoramiento de la Calidad de Combustibles impulsado por el Gobierno Nacional, ejecutado por la Empresa Pública EP-Petroecuador, contribuirá de manera significativa a mejorar la calidad del aire en todo el territorio nacional y por ende la calidad de vida de los ecuatorianos, al comercializar Diesel Premium con menor contenido de azufre.

Además, en el Decreto Ejecutivo No. 1303 emitido el 17 de septiembre de 2012, se declara de interés nacional el desarrollo de plantas oleaginosas con alta productividad de kg de aceite / hectárea para biocombustibles en el país como medio para el impulso del fomento agrícola. Adicionalmente, estipula la mezcla de diesel-biodiesel inicialmente del 5%, el mismo que se expenderá a nivel nacional en el 2014.

Esta nueva tecnología, invoca hacia una nueva era ambiental, no solo orientado al consumir diesel premium y optimizar la calidad del combustible para reducir la contaminación producida por la emisión de gases de los vehículos, sino optando por la utilización de fuentes alternativas de energía como el uso parcial de biocombustibles mezclados con combustibles fósiles.

Teniendo en cuenta que los biocombustibles aparecieron como una solución para los problemas de contaminación, especialmente para la reducción de gases de efecto invernadero, se puede

incentivar al desarrollo de las economías agrícolas regionales y reducir la dependencia de la economía en base a combustibles fósiles.

Por las razones antes mencionadas se ha realizado mezclas diesel-biodiesel, iniciando con la caracterización mediante pruebas fisicoquímicas de diesel y dos tipos de biodiesel, uno obtenido a nivel del laboratorio y otro refinado que cumple especificación. En este contexto, se sustituye parcialmente combustible fósil por biocombustible, reduciendo las emisiones contaminantes provocadas por fuentes móviles, lo cual se evidenció al probarlos en un vehículo con motor a diesel.

Finalmente, mediante la aplicación de pruebas estadísticas de significancia se comprueba que los datos obtenidos relacionados con la concentración de emisiones contaminantes provocadas por la fuente móvil en prueba, no difieren significativamente, por lo que se consideran representativos en la población.

1. BIODIESEL

1.1 Definición de biodiesel [1]

Es un biocombustible compuesto de mono-alquil ésteres de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites vegetales o grasas animales, designados B100, que se obtiene mediante procesos industriales de esterificación y trans-esterificación.

1.2 Materias primas para la obtención de biodiesel

El biodiesel se lo puede obtener a partir de fuentes de aceite vegetal como el aceite de palma, colza, piñón, lino, girasol, maní, cocotero, entre otros; los cuales poseen alto contenido de olefinas. Además, también se pueden utilizar grasas animales para su obtención, entre las cuales se mencionan a las de cerdo, gallina, pescado y los subproductos como los aceites de frituras.

A los aceites también se los puede evaluar mediante el cumplimiento de ciertas propiedades fisicoquímicas relacionadas con el combustible. (Ver Anexo A)

“En Ecuador, la evolución de la superficie sembrada del cultivo de palma africana ha mantenido un crecimiento considerablemente sostenido; conforme los datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), en el año 2012 se registraron 244.574 hectáreas sembradas a nivel nacional.

Se estima que en el 2012 se produjeron 505.000 toneladas de aceite de palma, distribuidas entre el consumo doméstico (205.000 TM) y las exportaciones (300.000TM). Si se cumplen las metas de productividad propuestas se espera que en el 2020 se produzcan 869.569 TM.” [2]

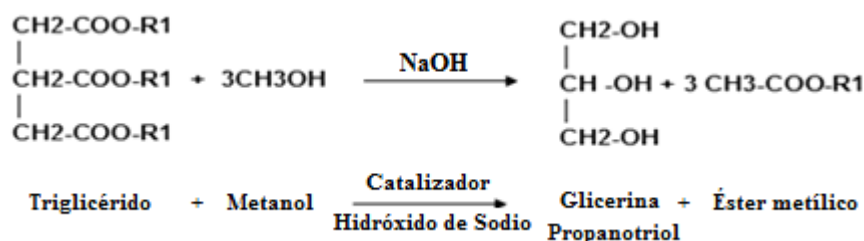
Ecuador representa el segundo productor de palma africana en América Latina y el quinto en el mundo; su producción se concentra en tres zonas específicamente: Santo Domingo, Esmeraldas y zona Oriental. La producción de aceite crudo de palma africana es absorbida por la Industria Refinadora que básicamente está compuesta por 4 empresas: ALES, DANEC, EPACEM y LA FABRIL.

En el 2011 los precios internacionales promedio de los aceites de palma y sus derivados, alcanzaron niveles históricamente altos. En este sentido se ha presentado un crecimiento en la demanda, basado en el mayor consumo de aceites vegetales por la industria del biodiesel, principalmente en países industrializados. [3]

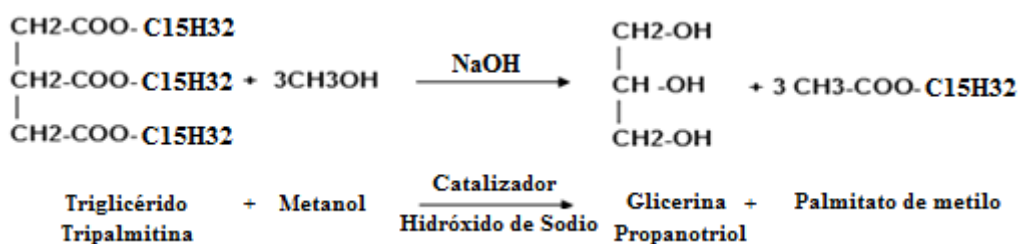
1.3 Reacción de obtención del biodiesel

Para la obtención de biodiesel se debe realizar un proceso de trans-esterificación, que consiste en hacer reaccionar el aceite vegetal o grasa animal (triglicéridos: ésteres de ácidos grasos libres con glicerol) con un alcohol ligero (C1-C4), generalmente metanol o etanol, en presencia de un catalizador, generalmente una base fuerte como hidróxido de sodio; dejando como residuo propanotriol (glicerina).

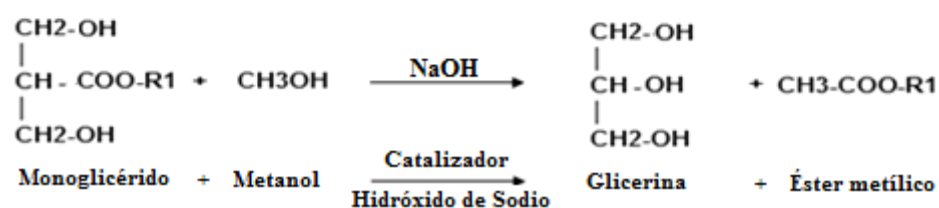
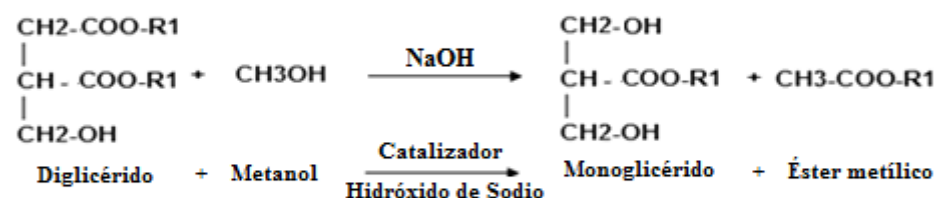
Esquema general para la reacción de trans-esterificación:



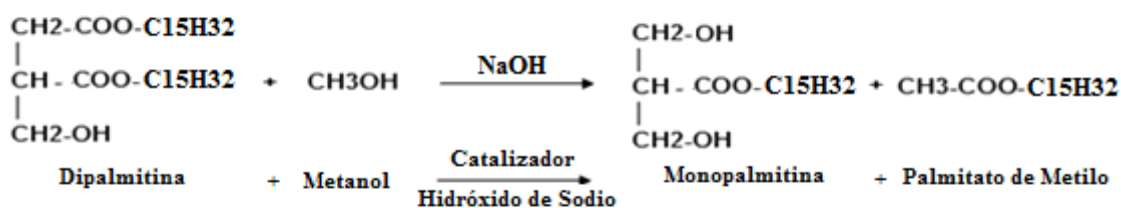
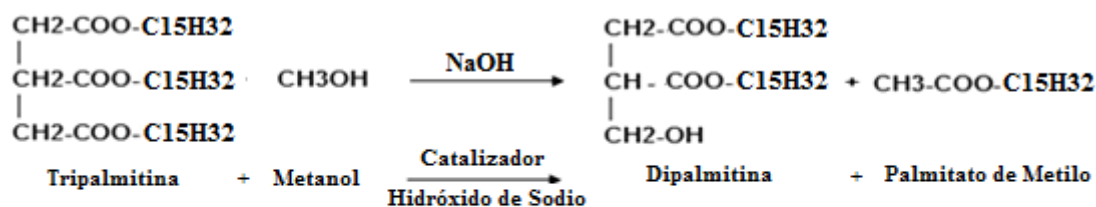
La reacción representativa para la obtención de biodiesel a partir de aceite de palma africana está dada por el siguiente esquema, suponiendo que en mayor proporción está formado por tripalmitina.



1.3.1 Mecanismo de reacción para la obtención de biodiesel. Consiste en tres reacciones reversibles y consecutivas, en donde el triglicérido es convertido consecutivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina. En cada reacción un mol de éster metílico es liberado, como se puede apreciar en las siguientes reacciones.



El mecanismo de reacción representativo para la obtención de biodiesel a partir de aceite de palma africana está dado por el siguiente esquema, suponiendo que en mayor proporción está formado por tripalmitina.



1.4 Características del biodiesel

Las características más importantes del biodiesel se mencionan a continuación:

- ✓ Líquido a temperatura ambiente, de un color que varía entre dorado y marrón oscuro según el tipo de materia prima usada.
- ✓ Biocombustible que sirve como aditivo del diesel.
- ✓ Tiene mejores propiedades lubricantes y mayor índice de cetano con respecto al diesel.
- ✓ Adecuada combustión con menor relación de aire / combustible, lo cual se debe al contenido de oxígeno que posee en su estructura.
- ✓ Se degrada cuatro veces más rápido que el diesel.
- ✓ No contiene en su composición azufre.
- ✓ Reduce las emisiones contaminantes.
- ✓ No es miscible con agua y tiene características higroscópicas absorbiendo agua de la humedad atmosférica.
- ✓ Descompone el caucho natural, por lo que es necesario sustituirlo por elastómeros sintéticos en caso de utilizar mezclas combustibles.
- ✓ Es compatible con el polietileno de alta densidad, con metales como acero inoxidable y aluminio.
- ✓ Al utilizar mezclas diesel-biodiesel en fuentes móviles se reduce significativamente el desgaste del circuito de combustible y se extiende la vida útil de los inyectores que dependen de la lubricación del mismo.

1.5 Especificaciones para el biodiesel

Se deben realizar una serie de ensayos para comprobar la calidad del combustible y el nivel de impurezas remanentes en el proceso de producción del biodiesel, para ello existen normativas en el ámbito europeo (EN), americano (ASTM) y ecuatoriano (NTE INEN) basadas en las anteriores.

1.5.1 NORMA EN 14214:2008. Especificación para biodiesel. La Unión Europea define la composición y propiedades de los ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME), denominados biodiesel. (Ver Anexo B)

1.5.2 NORMA ASTM D 6751:2012. Especificación estándar para mezclas de combustible biodiesel (B100) para los combustibles destilados medios. La ASTM (American Society of

Testing and Materials) establece una norma de especificaciones relacionados con el biodiesel. (Ver Anexo C)

1.5.3 NORMA NTE INEN 2482:2009. Requisitos biodiesel. En Ecuador, de acuerdo a la norma técnica emitida por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), se establecen los requisitos de la Tabla 1, que deben cumplir los esteres metílicos o etílicos de ácidos grasos que van a ser usados como combustibles para motores de ciclo diesel.

Tabla 1. Norma NTE INEN 2482-2009. Requisitos biodiesel

REQUISITOS	UNIDAD	Mínimo	Máximo	Métodos de Ensayo
Densidad a 15° C	kg/m ³	860	900	ASTM D 1298
Punto de Inflamación	°C	120	--	ASTM D 93
Punto de Turbidez	°C	Reportar ¹		
Φ Agua y sedimento	%	---	0,05	ASTM D 1796
Contenido de Agua	mg/kg	---	500	ASTM D 95
Viscosidad Cinemática a 40° C	mm ² /S	3,5	5	ASTM D 445
Cenizas Sulfatadas	% (m/m)	---	0,02	ASTM D 874
Contenido de Azufre	mg/kg	---	10	ASTM D 1552
W Carbón Residual ²	%	---	0,05	ASTM D 4530
Corrosión lámina de cobre	Clasificación	---	3	ASTM D 130
Número de cetano	-	49	---	ASTM D 613
Temperatura de destilación al 90% recuperado	°C	---	360	ASTM D 1160
W Glicerina libre	%	--	0,02	ASTM D 6584
W Glicerina total	%	--	0,25	ASTM D 6584
W Contenido de ésteres	%	96,5	--	EN 14103
Índice de yodo	g yodo/100 g	---	120	EN 14111
W Contenido de metanol	%	--	0,20	ASTM D 4815 EN 14110
Contenido de fósforo	mg/kg	---	10	ASTM D 4951
Contenido de metales alcalinos (Na + K)	mg/kg	---	5	EN 14108
Contenido de metales alcalinos (Ca + Mg)	mg/kg	--	5	prEN 14538
Número de acidez	mg KOH/g	---	0,5	ASTM D 664

¹ El punto de turbidez del biodiesel generalmente es mayor que el diesel de origen fósil y debe ser tomado en consideración para los procesos de mezcla

² Debe ser determinado en el 100% de la muestra

FUENTE: Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). Norma técnica ecuatoriana. NTE INEN 2482:2009. Biodiesel. Requisitos. Publicación 2009. p. 2.

1.6 Experiencia internacional del uso de biodiesel como combustible

A nivel mundial se destaca el desarrollo de políticas de estímulo al uso de combustibles renovables que contemplan principalmente: leyes que crean los mercados e incentivos económicos que favorecen su producción.

Según el F.O. Licht's World Ethanol & Biofuels Report, la producción de biodiesel en el mundo en el 2006 habría superado los 3500 millones de litros, siendo Alemania el principal productor,

seguido de Francia, Estados Unidos, Italia y Austria. [4] Todo para fomentar el uso de los biocombustibles como sustitutos de combustibles fósiles para efectos de transporte y contrarrestar el impacto ambiental.

“En Alemania, se utiliza biodiesel puro o en mezcla con combustible fósil para impulsar una gama amplia de vehículos. Aunque el uso de biodiesel todavía es controversial por causas de insumos agrícolas adicionales, también la Agencia Ambiental Federal toma en cuenta los beneficios ecológicos, como la disminución de emisiones netas de CO₂.

Francia, impulsa iniciativas especiales con la finalidad de potenciar el uso de energías limpias y reducir las emisiones de CO₂. Por otra parte, los principales fabricantes de automóviles producen cada vez más vehículos limpios.

En Estados Unidos, el biodiesel y sus mezclas con diesel son vendidos con las mismas tasas de impuestos que el diesel convencional. Además existen incentivos que el gobierno federal ofrece para financiar programas de desarrollo y fabricación de vehículos adaptados a combustibles alternativos.” [5]

Lo antes mencionado, demuestra que el biodiesel actualmente es una realidad, al ser utilizado en motores a diesel, de forma directa o en mezclas con diesel de origen fósil, por lo que su producción cada vez es mayor, principalmente en países de Europa y América Latina. (Ver Anexo D)

Es así, que varios gobiernos han anunciado metas ambiciosas de producción de biodiesel en sus países, entre los que destacan:

- ✓ Malasia: 450 millones de litros/año de biodiesel de palma hacia el 2007
- ✓ Brasil: 2.000 millones de litros/año de biodiesel, principalmente de palma, ricino y soya, hacia el 2012.
- ✓ India: 4.500 millones de litros/año de biodiesel de piñón.
- ✓ Indonesia: 4.700 millones de litros/año de biodiesel de palma hasta el 2025.

Por otro lado, actualmente en Sudamérica existe un posicionamiento bien marcado con políticas activas relacionadas con desarrollo de biocombustibles por parte de Brasil y Colombia.

1.7 Situación actual de producción de biodiesel en Ecuador

El análisis de la situación actual de producción de biodiesel en Ecuador empieza a partir de la cadena productiva de palma africana, debido a que ha sido definida como la materia prima con mayor potencial para la producción de este biocombustible. (Ver Anexo E)

A partir del año 2004, la industria de aceite de palma en el Ecuador cubre el 100% de la demanda local y empieza a tener excedentes en su producción, los mismos que desde esa época se exportan a diferentes destinos. Desde entonces el sector palmicultor ecuatoriano y, de forma especial las industrias extractoras de aceite, se interesaron en la generación de un nuevo uso para su producto, lo cual se hace realidad con la firma del Decreto Ejecutivo No. 1303 emitido el 17 de septiembre de 2012, en el que se declara de interés nacional el desarrollo de biocombustibles en el país como medio para el impulso del fomento agrícola. Adicional, señala que la producción, el uso y el consumo de los biocombustibles responderán a una estrategia inclusiva de desarrollo rural, precautelando la soberanía alimentaria y sostenibilidad ambiental.

Dicho decreto, además estipula la mezcla obligatoria, inicialmente del 5% en volumen (B5) de biodiesel, en el combustible diesel que se expendirá a nivel nacional a partir del mes de marzo de 2014. Es así, como el proyecto entusiasma a empresas como La Fabril, Danec, Ales y Agroparaíso, que planifican montar plantas de producción o ampliar las instalaciones de sus industrias. [6]

Se conoce que por cada hectárea de palma se producen aproximadamente 4 toneladas de aceite de palma, según los registros de los últimos meses del 2012. En el país habría 1,5 millones de hectáreas aptas para sembrar palma. Actualmente se producen 500 mil toneladas de aceite de palma en el Ecuador, de las cuales el 50% son exportadas. [7]

1.8 Producción de biodiesel en La Fabril

La Fabril es una empresa ecuatoriana que inició su labor en el sector agroindustrial en 1978 como refinadora de aceites y grasas vegetales. La Fabril S.A está ubicada en el Kilómetro 5 ½, Vía Manta-Montecristi, Provincia de Manabí, Ecuador.

La empresa es especializada en la producción y comercialización de aceites y grasas vegetales con calidad superior, al menor costo y de una manera eficaz, eficiente y flexible.

Además ha incursionado exitosamente en el mercado internacional de los biocombustibles con la generación de un producto innovador llamado biodiesel obtenido a partir del aceite de palma virgen extraído por prensado mecánico, refinado, blanqueado, y desodorizado (RBD); (Ver Anexos F-G-H); el mismo que cumple con las especificaciones estándares ASTM D 6751-06e1 para B100 (mezclas con Diesel).

Actualmente, La Fabril está dispuesta a cubrir la demanda que se generará en el país tras la aplicación del Decreto 1303 que se ejecutará en el 2014.

1.9 Producción de biodiesel en Palmar del Río

Palmar del Río es una empresa dedicada a la producción de palma africana y extracción de aceite rojo. Se encuentra ubicada en la Provincia de Francisco de Orellana, El Coca, Ecuador.

Esta empresa ha buscado una alternativa genética al desarrollar una especie de palma africana híbrida que resulta del cruce genético de semillas oleíferas de la selva brasileña (*Elaeis oleífera*) con polen LaMé (*Elaeis guineensis*), dando origen a palmas OxG, económicamente viables, con alta producción de fruta, niveles aceptables de extracción de aceite, buena calidad del aceite.

Es así entonces, a partir del año 1999 se inician los procesos de extracción de aceite rojo a nivel de laboratorio a partir de palma africana OxG, con el objeto de conocer los contenidos de aceite de esta especie, notando que el contenido de oleína de este material es del 94%, siendo esta una de las características más importantes para el desarrollo futuro de la síntesis de biocombustibles.

En abril de 2004, Palmar del Río inicia procesos de síntesis de éster metílico a partir de aceite rojo de palma de material (OxG) y Metóxido de Sodio, el mismo que es un producto estable y de característica superiores al combustible utilizado en los motores diesel. Adicional, este biocombustible fue probado en maquinaria agrícola de la empresa con éxito.

Cabe mencionar que esta empresa solamente produce biodiesel a pequeña escala, sin embargo con el fin de profundizar estudios con relación a los tan nombrados biocombustibles, Palmar del Río ha realizado ciertos estudios y análisis de su producto en convenio con la Escuela Politécnica Nacional, que dispone de un Banco de Pruebas para motores a diesel del Laboratorio de Termodinámica de Ingeniería Mecánica y además con la empresa Chemeg Cía. Ltda.

2. DIESEL

2.1 Definición de diesel [8]

También llamado gasoil, es un combustible derivado del petróleo y está compuesto aproximadamente de un 75% de hidrocarburos saturados (parafinas, isoparafinas y cicloparafinas) y un 25% de hidrocarburos aromáticos.

La fórmula química general del diesel se puede representar como $C_{12}H_{23}$, con intervalos de carbonos que van desde C_{10} - C_{21} .

Este líquido de color blanco o verdoso es utilizado principalmente como combustible en motores diesel y en calefacción.

2.2 Proceso de obtención del diesel

El diesel es obtenido en las refinerías a partir de petróleo por medio de una operación unitaria llamada destilación, el mismo que es separado en diferentes fracciones de acuerdo a su temperatura de ebullición y peso molecular. El diesel y sus fracciones se obtienen en un rango de temperatura entre 215°C a 338°C.

2.3 Especificaciones para el diesel

De acuerdo a la norma técnica emitida por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), NTE INEN 1489:2012, que establece los requisitos que deben cumplir el diesel que se comercializa en el Ecuador, a continuación se detalla los requisitos del diesel No. 1, diesel No. 2 y diesel premium.

Tabla 2. Norma NTE INEN 1489:2012. Requisitos del diesel No. 1

Requisitos	Unidad	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Punto de inflamación	°C	40	-	NTE INEN 1493 Procedimiento A
Φ Contenido de agua y sedimento	%	-	0,05	NTE INEN 1494
W Contenido de residuo carbonoso sobre el 10% del residuo de la destilación	%	-	0,15	NTE INEN 1491
W contenido de cenizas	%	-	0,01	NTE INEN 1492
Temperatura de destilación del 90%	°C	-	288	NTE INEN 926
Viscosidad cinemática a 37,8°C	cSt	1,3	3,0	NTE INEN 810
W contenido de azufre	%	-	0,3	ASTM 4294
Corrosión a la lámina de cobre	Clasificación	-	No. 2	NTE INEN 927
Índice de cetano calculado	-	40	--	NTE INEN 1495

FUENTE: Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). Norma técnica ecuatoriana. NTE INEN 1489:2012. Productos derivados del petróleo. Diesel. Requisitos. 2012. p. 1.

Tabla 3. Norma NTE INEN 1489:2012. Requisitos del diesel No. 2

REQUISITOS	UNIDAD	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Punto de inflamación	°C	51	-	NTE INEN 1493 Procedimiento A
Φ Contenido de agua y sedimento	%	-	0,05	NTE INEN 1494
W Contenido de residuo carbonoso sobre el 10% del residuo de la destilación	%	-	0,15	NTE INEN 1491
W contenido de cenizas	%	-	0,01	NTE INEN 1492
Temperatura de destilación del 90%	°C	-	360	NTE INEN 926
Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	2,0	5,0	NTE INEN 810
W contenido de azufre	%	-	0,7	ASTM D4294 NTE INEN 1490
Corrosión a la lámina de cobre	Clasificación	-	No.3	NTE INEN 927
Índice de cetano calculado	-	45	-	NTE INEN 1495
Contenido de biodiésel, $\Phi_{\text{Biodiésel}}$	%	---	5	EN 14078
NOTA. De no contener biodiésel no es necesario la realización de este ensayo.				

FUENTE: Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). Norma técnica ecuatoriana. NTE INEN 1489:2012. Productos derivados del petróleo. Diesel. Requisitos. 2012. p. 2.

Tabla 4. Norma NTE INEN 1489:2012. Requisitos del diesel premium

REQUISITOS	UNIDAD	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Punto de inflamación	°C	51	-	NTE INEN 1493 Procedimiento A
Φ Contenido de agua y sedimento	%	-	0,05	NTE INEN 1494
W Contenido de residuo carbonoso sobre el 10% del residuo de la destilación	%	-	0,15	NTE INEN 1491
W contenido de cenizas	%	-	0,01	NTE INEN 1492
Temperatura de destilación del 90%	°C	-	360	NTE INEN 926
Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	2,0	5,0	NTE INEN 810
W contenido de azufre	%	-	0,05	ASTM 4294 NTE INEN 1490
Corrosión a la lámina de cobre	Clasificación	-	No.3	NTE INEN 927
Índice de cetano calculado	-	45	-	NTE INEN 1495
Contenido de biodiésel, $\Phi_{\text{Biodiésel}}$	%	---	5	EN 14078
NOTA. De no contener biodiésel no es necesaria la realización de este ensayo.				

FUENTE: Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). Norma técnica ecuatoriana. NTE INEN 1489:2012. Productos derivados del petróleo. Diesel. Requisitos. 2012. p. 2.

2.4 Diesel a nivel mundial

La constante amenaza de agotamiento del petróleo unido a la necesidad de energías más limpias ha dado un impulso mundial al uso de otras fuentes de energía y biocombustibles. Si bien a nivel mundial se está avanzando a pasos acelerados, aún se está lejos de eliminar la dependencia de los combustibles fósiles. [9]

Tras los últimos cuarenta años, el uso de combustibles fósiles ha continuado creciendo y su participación en el suministro energético se ha incrementado.

Según la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) en su Perspectiva Petrolera Mundial 2009, la demanda mundial de combustible destilado intermedio, principalmente diesel, crecerá más rápido que cualquier otro producto refinado de petróleo hacia el 2030.

Así, mientras el mundo continúe con la dependencia de consumir combustibles fósiles debe buscar la manera de que sean menos contaminantes, estableciendo normativas en cada país y ejecutando procesos adicionales en las refinerías para sustraer el sulfuro que contiene el diesel, hasta por lo menos un límite del 0.05 %P, siendo esto una tendencia mundial actual. (Ver Anexo J)

2.5 Diesel en Ecuador

Ecuador tiene una política de subsidios a los combustibles fósiles y un elevado nivel de dependencia petrolera.

La Empresa Pública de Hidrocarburos del Ecuador EP-Petroecuador gestiona el sector hidrocarburífero en el alcance nacional, la misma que a partir del 5 de Enero de 2012 empezó a comercializar Diesel Premium de hasta 500 ppm de contenido de azufre en lugar del Diesel 2 de hasta 7000 ppm que se despachaba anteriormente, esto con respecto a una primera etapa del cumplimiento del Plan de Mejoramiento de la Calidad de Combustibles impulsado por el Gobierno Nacional, finalmente en la segunda etapa del proyecto culminada en Octubre de 2012 comercializó Diesel Premium de hasta 250 ppm de contenido de azufre, con lo cual busca disminuir la emisión de gases contaminantes y mejorar la calidad del aire.

La producción de diesel se ha mantenido alrededor de los 10 millones de barriles al año, la importación de los mismos ha crecido en 200% pasando de los 5 millones en 2004 hasta los 15 millones en 2011. **[10]**

Finalmente, según EP-Petroecuador este escenario va a cambiar radicalmente con la creación de la Refinería del Pacífico en el año 2017, en donde mediante los respectivos estudios, presentan las estimaciones de crecimiento de la demanda de diesel en el Ecuador. (Ver Anexo K)

3. MOTOR DIESEL

3.1 Definición de motor diesel [11]

Es un motor térmico de combustión interna alternativo, en el cual el encendido del combustible se logra por la temperatura elevada que produce la compresión del aire en el interior del cilindro, según el principio del ciclo del diesel.

El autoencendido se da por la temperatura al final de la compresión, la misma que está por encima del punto de inflamación del combustible, de tal manera que se inflama por sí mismo sin necesidad de chispa.

3.2 Funcionamiento del motor diesel

El funcionamiento de este tipo de motor se muestra en la Figura 1 y consiste en lo siguiente:

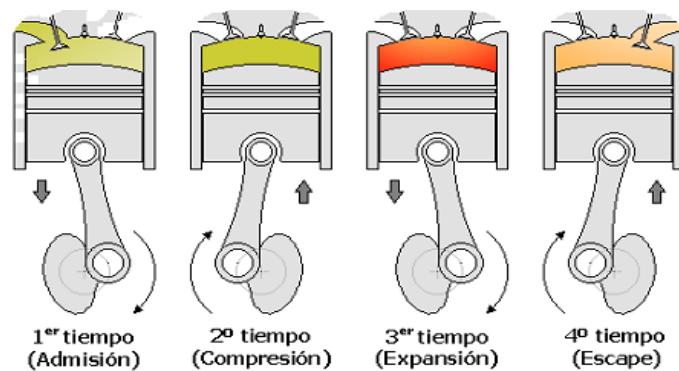


Figura 1. Motor diesel de cuatro tiempos

- ✓ El proceso de compresión en el motor comienza cuando el pistón está en el punto muerto inferior y empieza su carrera de ascenso comprimiendo el aire contenido en el cilindro.
- ✓ El combustible se inyecta en la parte superior de la cámara de combustión a gran presión desde unos orificios muy pequeños que presenta el inyector de forma que se atomiza y se mezcla con el aire a alta temperatura y presión.

- ✓ La mezcla se inflama muy rápidamente. Esta combustión ocasiona que el gas contenido en la cámara se expanda, impulsando el pistón hacia abajo.
- ✓ Esta expansión provoca que la biela transmita un movimiento rotativo al cigüeñal.

3.3 Proceso de combustión en motores a diesel

El ciclo del motor diesel de cuatro tiempos consiste en las siguientes etapas, asumiendo que el fluido termodinámico que evoluciona es un gas perfecto (aire) y que todos los procesos son ideales y reversibles.

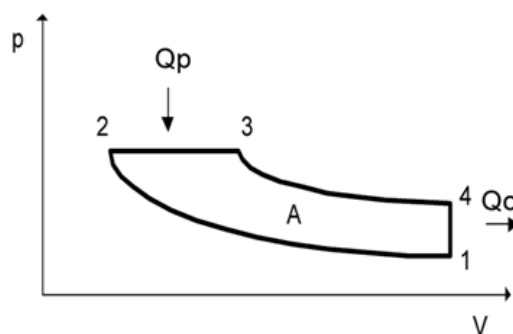


Figura 2. Ciclo termodinámico Diesel

3.3.1 Compresión, proceso 1-2. Es un proceso de compresión adiabática reversible (isoentrópica). Ello eleva el estado termodinámico del fluido, aumentando su presión, su temperatura y disminuyendo su volumen específico, en virtud del efecto adiabático.

3.3.2 Combustión, proceso 2-3. El aporte de calor Q_p se simplifica por un proceso isóbaro (a presión constante). Consecuencia de la combustión es el elevamiento súbito del estado termodinámico del fluido, en realidad debido a la energía química liberada en la combustión.

3.3.3 Explosión/Expansión, proceso 3-4. Se simplifica por una expansión isentrópica (adiabática) del fluido termodinámico, hasta el volumen específico que se tenía al inicio de la compresión. En la realidad, la expansión se produce a consecuencia del elevado estado termodinámico de los gases tras la combustión.

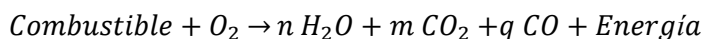
3.3.4 Escape, proceso 4-1. Esta etapa es un proceso isocórico, es decir, a volumen constante. Desde la presión final de expansión hasta la presión inicial de compresión.

3.4 Química de combustión

La reacción de combustión se basa en una reacción química exotérmica de una sustancia (o una mezcla de ellas) denominada combustible y el comburente, generalmente oxígeno (O₂). Los productos que se forman por dicha reacción son el dióxido de carbono (CO₂), agua (H₂O).

Si el combustible contiene dióxido de azufre se formará (SO₂) y pueden aparecer óxidos de nitrógeno (NO_x), dependiendo de la temperatura y la cantidad de oxígeno en la reacción. Por otro lado, si la combustión es incompleta los productos que se queman pueden no reaccionar con el mayor estado de oxidación, debido a que el comburente y el combustible no están en la proporción adecuada, dando como resultado compuestos como el monóxido de carbono (CO).

Para iniciar la combustión de cualquier combustible, es necesario alcanzar una temperatura mínima, llamada temperatura de ignición.



3.5 Factores que influyen en la combustión

3.5.1 Combustible. Variación de calidad y la presencia de contaminantes naturales.

3.5.2 Combustión. Relación $\left(\frac{\text{aire}}{\text{combustible}}\right)$ y las condiciones operacionales en el motor.

3.5.3 Energía. Las reacciones de oxidación de combustibles son exotérmicas (-ΔH), dando como productos de la combustión una mezcla de gases formada por: CO₂, CO, H₂O, NO_x, SO₂, SO₃, HC.

4. MEZCLAS DIESEL-BIODIESEL

4.1 Mezclas diesel-biodiesel como combustible

Este tipo de mezclas están constituidas por el combustible biodiesel y el combustible diesel a base de petróleo, designado BXX, donde XX representa el porcentaje en volumen de biodiesel en la mezcla.

4.2 Especificaciones para mezclas diesel-biodiesel

La ASTM aprobó una especificación para mezclas diesel que contienen entre 6 y 20% de biodiesel.

Tabla 5. Norma ASTM D7467-10. Especificación estándar para Diesel. Biodiesel Mezcla (B6-B20)

Propiedad	Unidad	Mínimo	Máximo
Punto de inflamación	°C	52	-
Agua y sedimentos	% vol.	-	0,05
Ceniza	% (m/m)	-	0,01
Azufre			
-S15	ppm	-	0,0015
-S500	ppm	-	0,05
Corrosión en lámina de cobre	Clasificación	-	No. 3
Índice de cetano	-	40	-
Residuo carbonoso	% (m/m)	-	0,35
Valor ácido	mg KOH/g	-	0,3
Estabilidad a la oxidación	horas	6	-
Lubricación	Micrones	-	520
Contenido de biodiésel	% volumen	6	20

FUENTE: American Society of Testing and Materials (ASTM). NORMA ASTM D7467-10. Especificación estándar para diesel fueloil, biodiesel mezcla (B6-B20). Publicación 2010. p. 2.

4.3 Experiencia en Ecuador acerca del uso de mezclas diesel-biodiesel como combustible y abastecimiento de la demanda nacional

En los últimos años, la búsqueda de alternativas para tratar de reemplazar el combustible fósil,

especialmente por la contaminación que genera y la reducción en las reservas mundiales, ha llevado a la producción de biocombustibles.

Actualmente, en Ecuador, el sector automotriz no consume biocombustibles puros o en mezcla con combustibles fósiles. Sin embargo, se presentan nuevas alternativas para obtener combustibles no contaminantes, basados en el Decreto Ejecutivo 1303, el cual se deberá cumplir en el 2014. Este decreto, prevé que el diesel premium utilizado por fuentes móviles, debe tener una mezcla de biodiesel del 5%, la misma que deberá incrementarse hasta llegar al 10%. Además, hay que considerar que no se aconseja utilizar cantidades elevadas de biodiesel en mezclas con diesel debido a los daños que causan en los empaques de los vehículos.

En este sentido, se considera que el promedio de producción de diesel, como derivado del petróleo corresponde a 798,9 miles de barriles/año y el consumo promedio de este combustible es de 2852,3 miles de barriles/año. [12] Además es importante mencionar que la demanda de biodiesel será cubierta por la empresa La Fabril, ya que es la mayor productora de biodiesel en el país, la misma que ha exportado a varios países 80 mil toneladas aproximadamente durante los primeros 9 meses del 2012 y solo en el último trimestre del mismo año ha enviado aproximadamente 30 mil toneladas.

La petrolera ecuatoriana EP-Petroecuador recibirá aproximadamente 17 mil toneladas de biocombustible por mes, sin embargo el decreto establece que se necesitan 5,25 millones de galones de biodiesel mensuales equivalentes a 17,9 mil toneladas de biocombustible, por lo que inicialmente se abastecerá solamente con 6 mil toneladas.

Algunos estudios de proyecciones de la cobertura del mercado nacional con biodiesel y los volúmenes requeridos de biodiesel por parte de EP-Petroecuador se detallan en el Anexo L.

5. EMISIONES CONTAMINANTES PROVOCADAS POR FUENTES MÓVILES

5.1 Contaminantes generados por la combustión del diesel

Todos los combustibles fósiles son contaminantes del medio ambiente a través de los gases que salen del escape, entre los cuales se encuentran: CO₂, CO, material particulado, SO_x, compuestos orgánicos volátiles y NO_x.

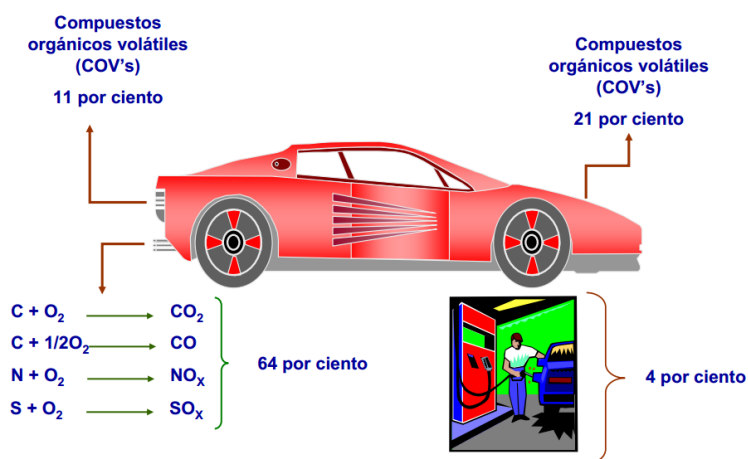
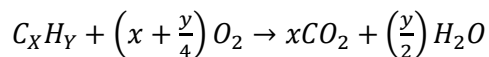
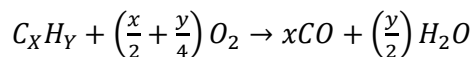


Figura 3. Emisiones contaminantes producidas por un vehículo

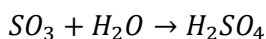
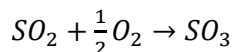
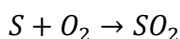
5.1.1 Dióxido de Carbono. Es producido por la reacción de combustión efectuada en el motor de un vehículo, si ésta fuera completa. Actualmente, el CO₂ es de gran preocupación mundial, ya que contribuye al efecto invernadero. La reacción se representarse algebraicamente de la siguiente manera:



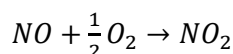
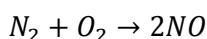
5.1.2 Monóxido de Carbono. Es producto de una combustión incompleta al no efectuarse con totalidad la oxidación del combustible y formar CO₂.



5.1.3 Dióxido de azufre. Uno de los mayores contaminantes que sale por el conducto de escape como óxido de azufre (SO_x), el cual con la humedad del aire se convierte en ácido sulfúrico contribuyendo a la generación de la lluvia ácida. Además, acorta la vida útil de partes metálicas del vehículo por su efecto corrosivo.



5.1.4 Óxidos de Nitrógeno. Son generados en los gases de escape debido a las altas temperaturas de combustión. Los óxidos de nitrógeno también son precursores de la lluvia ácida ya que generan ácido nítrico.



5.1.5 Material particulado [13]

- ✓ PM2.5: El material particulado menor a 2.5 micrones, no debe exceder el límite máximo fijado en la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire 15 µg/m³ y el valor referencial recomendado por la OMS 10 µg/m³.
- ✓ PM10: Material particulado menor a 10 micrones, no debe exceder el límite máximo fijado en la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire 50 µg/m³.

5.2 Efectos de las emisiones contaminantes

- ✓ La lluvia ácida se forma por los óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre emitidos por los vehículos en combinación con la humedad en el aire.
- ✓ El efecto invernadero debido principalmente al uso intensivo de los combustibles fósiles, aporta con el calentamiento global.
- ✓ Las pequeñas partículas de los motores diesel son también muy peligrosas para el sistema respiratorio de las personas, ya que pueden depositarse en los pulmones.
- ✓ Las emisiones del diesel causan cáncer del pulmón, y pueden también causar cáncer de vejiga. De acuerdo a los estudios del California Air Resources Board, el estar expuesto

durante toda la vida a la contaminación del diesel puede significar una muerte prematura de cáncer. [14]

5.3 Métodos para medir los gases emitidos para fuentes móviles con motor a diesel

Los métodos para determinar las emisiones contaminantes provocadas por fuentes móviles son:

5.3.1 Norma NTE INEN 2202:2000. Gestión Ambiental. Aire. Vehículos automotores. Determinación de la opacidad de emisiones de escape de motores a diesel mediante la prueba estática. Método de aceleración libre. El ensayo consiste en la determinación del porcentaje de luz visible que se absorbe y refleja cuando un haz de ésta atraviesa la corriente de las emisiones provenientes del sistema de escape de un motor a diesel.

5.3.2 Norma NTE INEN 2207:2002. Gestión Ambiental. Aire. Vehículos automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de diesel. Esta norma cuantifica de forma dinámica las emisiones contaminantes provocadas por toda fuente móvil (con motor a diesel), como monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas.

5.3.3 Sensores de variación infrarroja. Estos sensores permiten que la luz pase a través de la muestra de gases contaminantes producidos por la fuente móvil en una celda de medición, la misma que es comparada con otra que posee un gas de referencia. [15]

5.3.4 Equipo OEM 2100 MONTANA. Este equipo está diseñado para determinar las emisiones contaminantes provocadas por fuentes móviles, utilizando datos operativos del motor y del vehículo para obtener concentraciones de gases contaminantes como: CO, CO₂, HC, NOx y material particulado. Cabe mencionar que este es el equipo que se utilizó en la tesis para la evaluación de emisiones contaminantes.

6. PRUEBAS ESTADÍSTICAS DE SIGNIFICANCIA

La aplicación de la estadística está basada en la estimación mediante el estudio de una muestra de una población para generalizar las conclusiones hacia toda la población. Ésta puede ser utilizada para realizar la comparación de las mediciones y comprobar su diferencia significativa.

6.1 Prueba-t

La prueba de significación detecta los errores sistemáticos mediante la comparación de dos medias experimentales aplicada cuando un método es aplicado repetidas veces para analizar dos muestras diferentes.

$$t_{\text{calculado}} = \frac{(X_1 - X_2)}{\sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right) * \left(\frac{s_1^2(n_1 - 1) + s_2^2(n_2 - 1)}{(n_1 + n_2 - 2)}\right)}} \quad (1)$$

Donde:

s_1^2 = Varianza de la primera muestra.

s_2^2 = Varianza de la segunda muestra.

X_1 = Media de la primera muestra.

X_2 = Media de la segunda muestra.

n_1 = Número de observaciones de la primera muestra.

n_2 = Número de observaciones de la segunda muestra.

Grados de libertad: $n_1 + n_2 - 2$

Se debe seguir los siguientes requisitos o suposiciones:

- ✓ Las poblaciones siguen una distribución normal.
- ✓ Las poblaciones muestreadas son independientes.
- ✓ Las desviaciones estándares de las dos poblaciones son iguales.

6.2 Prueba -F

Con la distribución F se pone a prueba si dos muestras provienen de poblaciones que tienen varianzas iguales y también se aplica cuando se desean comparar varias medias poblacionales en forma simultánea.

Aritméticamente está representada por la siguiente ecuación:

$$F_{\text{cal}} = \frac{\text{MST}(\text{entre} - \text{grupos})}{\text{MSE}(\text{dentro} - \text{grupos})} \quad (2)$$

Donde:

MST(entre – grupos) = Estimado de la varianza poblacional basado en las diferencias entre las medias poblacionales.

MSE(dentro – grupos) = Estimado de la varianza poblacional basado en la variación dentro de la muestra.

Si $F_{\text{cal}} > F_{\text{crit}}$ la variación entre-grupos es significativa comparada con la variación dentro-grupos.

6.3 Análisis de la varianza (ANOVA)

Es una técnica estadística usada para separar y calcular la variación debido a los errores aleatorios de la medición causada por cualquier factor.

La variación total del conjunto de resultados puede ser calculada por la combinación de las varianzas dentro-grupos y entre-grupos.

ANOVA se usa cuando se considera una sola variable o un solo factor y compara 3 o más medias poblacional para determinar si pueden ser iguales, para lo cual supone lo siguiente:

- ✓ Las poblaciones siguen una distribución normal.
- ✓ Las poblaciones tiene desviaciones estándar iguales.
- ✓ Las poblaciones son independientes.

6.3.1 Conceptos y parámetros utilizados en ANOVA

Tabla 6. Parámetros utilizados en ANOVA

<i>Fuente de variación</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Media cuadrática</i>	<i>F</i>
Entre-grupos	SST	k-1	$SST/(k-1)=MST$	MST/MSE
Dentro-grupos	SSE	n-k	$SSE/(n-k)=MSE$	
Total	SS total	n-1		

- ✓ *Suma de cuadrados:* Mide las varianzas dentro y entre-grupos. La suma de cuadrados dentro-grupos representa la variación debida al error aleatorio de la medición, mientras que la suma de cuadrados entre-grupos representa la variación debido a las diferencias entre las medias de los grupos.
- ✓ *Grados de libertad:* Es la cantidad de datos independientes usados para calcular el estadístico.
- ✓ *Media cuadrática:* Son las contribuciones de las varianzas al error total. Nos permite determinar si las diferencias entre-grupos de resultados es significativa comparada con la variación dentro-grupos.

La hipótesis nula establecida (H_0) es: No hay diferencia entre el promedio de cuadrados entre-grupos (MST) y dentro-grupos (MSE).

La hipótesis alternativa (H_1) es: El promedio de cuadrados entre-grupos (MST) es mayor que el promedio de cuadrados dentro-grupos (MSE).

En ANOVA se asume que el promedio medio entre-grupos (MST) siempre es mayor que el cuadrado medio dentro-grupos (MSE). Por lo tanto la prueba F deberá ser de una-cola.

7. PARTE EXPERIMENTAL

7.1 Obtención de biodiesel en Palmar del Río

La obtención de biodiesel en esta empresa consiste básicamente en dos procesos principales, los mismos que se mencionan a continuación:

- ✓ Extracción del aceite rojo de palma africana *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis* (OxG).
- ✓ Obtención de biodiesel mediante reacción de trans-esterificación.

Además, es importante mencionar que el biodiesel producido se lo obtuvo a nivel de laboratorio, con una cantidad correspondiente a 40 litros, siguiendo un procedimiento detallado e implementado por el Laboratorio de la Planta Extractora en base a experimentación.

7.1.1 Materiales y Equipos para la obtención de biodiesel

- | | | |
|-----------------------------|-----------------|-------------|
| ✓ Bandeja de acero (3) | | |
| ✓ Estufa Memmert | (R=0 - 500°C) | (Ap±0.01°C) |
| ✓ Prensa de laboratorio | | |
| ✓ Recipiente plástico | (V=1000 ml) | |
| ✓ Probeta (2) | (V=1000 ml) | (Ap±10 ml) |
| ✓ Vaso de precipitación (4) | (V=1000 ml) | (Ap±100 ml) |
| ✓ Balón de destilación (2) | (V=2000 ml) | |
| ✓ Placa de calor | | |
| ✓ Balanza analítica | (R=0 – 2000 g) | (Ap±0.001g) |
| ✓ Matraz Erlenmeyer (4) | (V=500 ml) | (Ap±50 ml) |
| ✓ Termómetro | (R= 0 – 200 °C) | (Ap±0.1 °C) |
| ✓ Agitador magnético (2) | | |
| ✓ Embudo de separación (2) | (V=1000 ml) | |
| ✓ Embudo (2) | | |
| ✓ Cedazos (3) | | |
| ✓ Papel filtro | | |
| ✓ Canecas plásticas (4) | (V=10 gal) | |

7.1.2 Sustancias y Reactivos para la obtención de biodiesel

- ✓ Aceite rojo de palma africana *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis* (OxG)
- ✓ Metanol (CH_3OH)
- ✓ Hidróxido de Sodio (NaOH)
- ✓ Agua (H_2O)

7.1.3 Procedimiento para la obtención de aceite y biodiesel

7.1.3.1 Obtención del aceite rojo de palma africana *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis* (OxG)

- ✓ Recibir los racimos de frutos de palma africana (OxG). Observar la fecha de ingreso, variedad, zona, año de cultivo, ciclo de cosecha y número de frutos desprendidos.
- ✓ Proceder a separar los frutos del raquis. Retirar toda clase de fibra, pedúnculos, espigas o afrecho que se encuentre adherida al fruto.
- ✓ Colocar los frutos en una plancha de acero y someterla a calentamiento en una estufa a 150°C durante 2 a 3 horas, de manera que el fruto logre deshidratarse hasta obtener una humedad final correspondiente a 8-12 %.
- ✓ Ajustar las piezas de la prensa de laboratorio (tuerca del cono contra la cámara de extracción del equipo).
- ✓ Llevar los frutos casi secos a la prensa de laboratorio y proceder a realizar la extracción.
- ✓ Recolectar el aceite extraído en un recipiente plástico. (Ver Anexos M-N)

Nota: Repasar la torta obtenida hasta extraer la máxima cantidad de aceite contenido en esta.

7.1.3.2 Obtención de biodiesel. El siguiente procedimiento detallado, hace referencia a la utilización de 1000 ml de aceite rojo de palma africana *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis* (OxG). (Ver Anexos P-Q)

- ✓ Verter en un balón de destilación 1000 ml de aceite rojo de palma africana (OxG) y someterlo a calentamiento utilizando una placa de calor hasta una temperatura de 60°C . Agitar permanentemente.
- ✓ Preparar una solución de metóxido de sodio, para lo cual se debe pesar 3,5 g de hidróxido de sodio y 200 ml de metanol con la ayuda de una balanza analítica. La reacción se debe efectuar con agitación permanente durante 30 minutos.

- ✓ Verter la solución de metóxido de sodio en el balón de destilación que contiene el aceite rojo de palma africana (OxG).
- ✓ Calentar la solución hasta una temperatura de 70 °C y agitar permanentemente durante 1 hora.
- ✓ Verter la solución formada en un embudo de separación, dejar enfriar y después de 12 horas separar los dos productos obtenidos, la capa ligera de aceite transparente arriba (biodiesel) y la capa densa y oscura abajo (glicerina).
- ✓ Separar las dos capas formadas en dos recipientes diferentes.
- ✓ El biodiesel obtenido lavarlo 3 veces con agua tibia ($T_{H_2O} = 40^{\circ}C$).
- ✓ Calentar el biodiesel a una temperatura de 65°C, de manera que se pueda eliminar el metanol presente.
- ✓ Filtrar el biodiesel obtenido.
- ✓ Caracterizar el biodiesel mediante ensayos fisicoquímicos para establecer su correspondiente control de calidad.
- ✓ Almacenar el biodiesel en un recipiente adecuado.

Nota: El procedimiento antes mencionado se debe repetir en varias ocasiones para obtener los 40 litros necesarios para efectuar el presente trabajo de graduación.

Para la obtención de volúmenes más grandes de biodiesel (200 litros), se puede utilizar un reactor batch en fase líquida, exclusivamente diseñado para la producción de este biocombustible en la empresa Palmar del Río, ubicado en la Planta Extractora de la misma.

7.1.4 Datos teóricos para la obtención de biodiesel

Definición de variables:

Tabla 7. Definición de variables para la obtención del biodiesel en Palmar del Río

Variable	Unidad	Variable
pa	g/cm ³	Densidad del aceite rojo de palma africana <i>Elaeis oleifera</i> x <i>Elaeis guineensis</i> (OxG)
pm	g/cm ³	Densidad del Metanol
ps	g/cm ³	Densidad del Hidróxido de Sodio
Va	ml	Volumen de aceite rojo de palma africana <i>Elaeis oleifera</i> x <i>Elaeis guineensis</i> (OxG)
Wa	g ó kg	Peso de aceite rojo de palma africana <i>Elaeis oleifera</i> x <i>Elaeis guineensis</i> (OxG)

Tabla 7 (Continuación)

Variable	Unidad	Variable
V _m	ml	Volumen de Metanol
W _m	g ó kg	Peso de Metanol
W _s	g ó kg	Peso de Hidróxido de Sodio

Tabla 8. Datos teóricos para la obtención de biodiesel

Sustancia	Densidad a 20°C (g/cm ³)
Aceite rojo de palma africana	0,887
Metanol	0,7918
Hidróxido de Sodio	2,1

FUENTE: <http://www.wearcheckiberica.es/documentacion/doctecnica/combustibles.pdf>

7.1.5 Datos experimentales para la obtención de biodiesel. Los valores de la Tabla 9, están basados en datos experimentales obtenidos en el laboratorio de Palmar del Río.

Notando lo anterior, los datos sombreados son los valores de referencia.

Tabla 9. Datos Experimentales para la obtención del biodiesel en Palmar del Río

Aceite rojo (OxG)	Metanol		Hidróxido de Sodio
V _a , (ml)	V _m , (ml)	W _m , (g)	W _s , (g)
200	40	31.672	0.700
250	50	39.590	0.875
300	60	47.508	1.050
350	70	55.426	1.225
400	80	63.344	1.400
450	90	71.262	1.575
500	100	79.180	1.750
550	110	87.098	1.925
600	120	95.016	2.100
650	130	102.934	2.275
700	140	110.852	2.450

Tabla 9 (Continuación)

Aceite rojo (OxG)	Metanol		Hidróxido de Sodio
Va, (ml)	Vm, (ml)	Wm, (g)	Ws, (g)
750	150	118.770	2.625
800	160	126.688	2.800
850	170	134.606	2.975
900	180	142.524	3.150
950	190	150.442	3.325
1000	200	158.360	3.500
10000	2000	1583.600	35.000
40000	8000	6334.400	140.000
200000	40000	31672.000	700.000

7.1.6 Cálculos para la obtención de biodiesel

Cálculo modelo para un volumen de 1000 ml de aceite rojo de palma africana OxG.

- ✓ Cálculo del peso del aceite rojo

$$W_a = V_a * \rho_a \text{ [g]} \quad (3)$$

$$W_a = 1000[\text{ml}] * 0,887 \left[\frac{\text{g}}{\text{ml}} \right]$$

$$W_a = 887 \text{ [g]}$$

- ✓ Cálculo del volumen de metanol

$$V_m = \frac{V_a \text{ 1000ml} * V_m \text{ 200ml}}{V_a \text{ 200ml}} \text{ [ml]} \quad (4)$$

$$V_m = \frac{1000[\text{ml}] * 40[\text{ml}]}{200[\text{ml}]} \text{ [ml]}$$

$$V_m = 200 \text{ [ml]}$$

- ✓ Cálculo del peso del metanol

$$W_m = V_m * \rho_m \text{ [g]} \quad (5)$$

$$W_m = 200[\text{ml}] * 0,7918 \left[\frac{\text{g}}{\text{ml}} \right]$$

$$W_m = 158,36 \text{ [g]}$$

- ✓ Cálculo del peso del Hidróxido de Sodio

$$W_s = \frac{V_{a\ 1000ml} * W_{s\ 200ml}}{V_{a\ 200ml}} \ [g] \quad (6)$$

$$W_s = \frac{1000[ml] * 0,70[g]}{200[ml]} \ [g]$$

$$W_s = 3,5 \ [g]$$

Además, se realizó dos regresiones para trabajar con mayor facilidad al momento de determinar las cantidades exactas de metanol y catalizador (Hidróxido de sodio), respectivamente. (Ver Gráficos 4-5)

Cálculo modelo para un volumen de 1000 ml de aceite rojo de palma africana (OxG).

- ✓ Cálculo del volumen de metanol

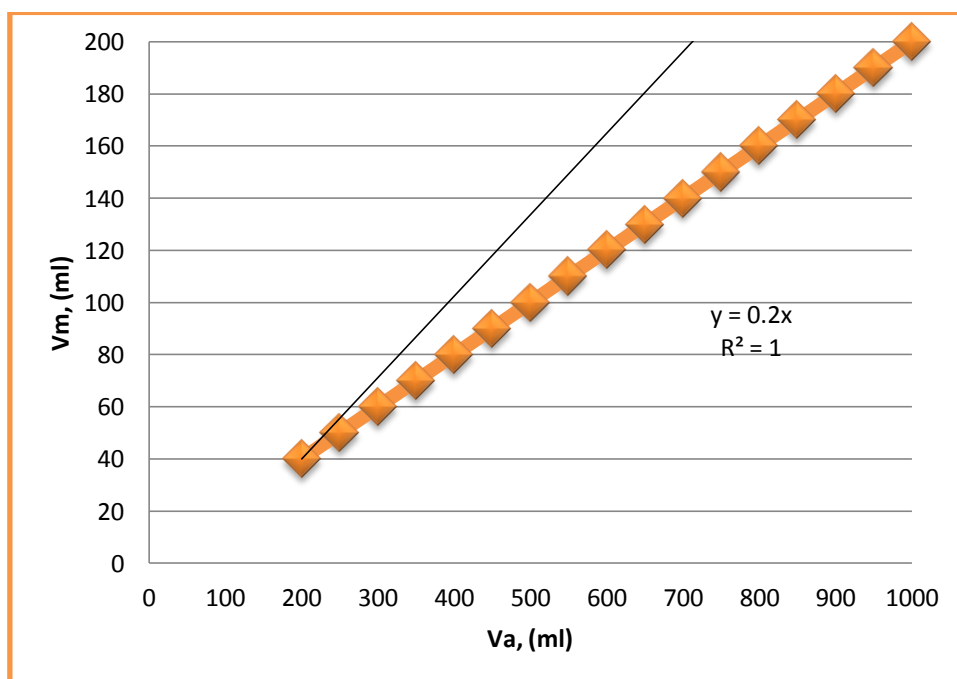


Gráfico 1. Volumen del metanol (Vm)=f(Volumen del aceite (Va))

Utilizando la ecuación lineal obtenida en el Gráfico 1, tenemos:

$$y = 0,2 * x \quad (7)$$

$$V_m = 0,2 * V_a \quad (8)$$

Por lo tanto,

$$V_m = 0,2 * 1000[ml]$$

$$V_m = 200 [ml]$$

✓ Cálculo del peso de Hidróxido de Sodio

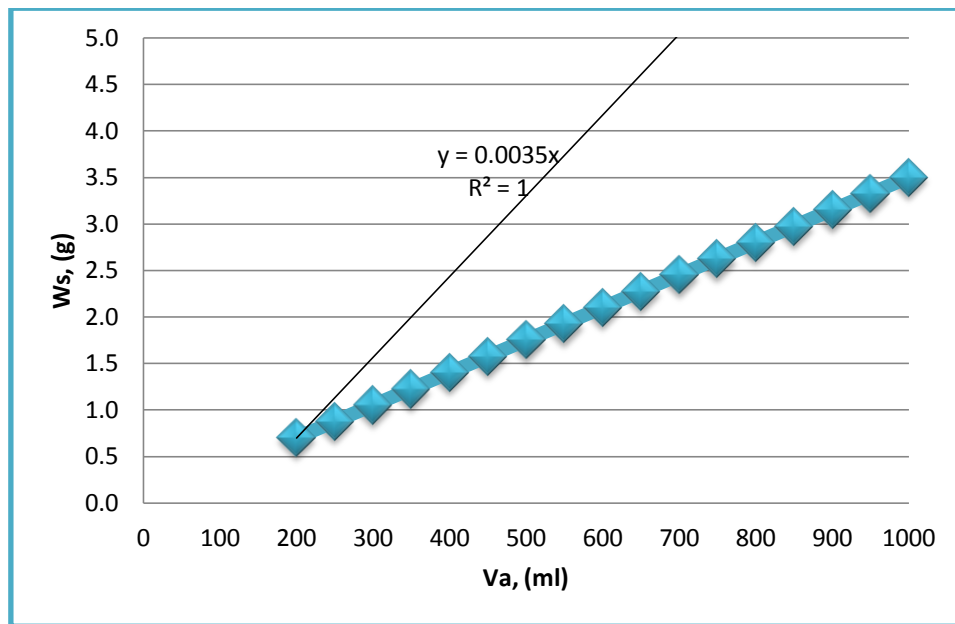


Gráfico 2. Peso del Hidróxido de Sodio (W_s)= f (Volumen de aceite (V_a))

Utilizando la ecuación lineal obtenida en el Gráfico 1, tenemos:

$$y = 0,0035 * x \quad (9)$$

$$W_s = 0,0035 * V_a \quad (10)$$

Por lo tanto,

$$W_s = 0,0035 \left[\frac{g}{ml} \right] * 1000[ml]$$

$$W_s = 3,5 [g]$$

7.2 Caracterización de muestras

Consiste en determinar ciertas propiedades fisicoquímicas de cada uno de los combustibles y sus determinadas mezclas, las mismas que deben cumplir las correspondientes normas técnicas establecidas en cada país.

Para evaluar las características del biodiesel se deberán cumplir los requisitos estipulados por la Norma NTE INEN 2482-2009 y en el caso del diesel premium, los requisitos impuestos en la Norma NTE INEN 1 489:2012.

Adicionalmente, se aplica un análisis cromatográfico mediante una técnica de destilación simulada (Simdis), basada en asumir los compuestos individuales de una muestra, los mismos que fluyen en su orden de punto de ebullición a través de una columna de cromatografía de gas tipo capilar. Los componentes de la muestra son identificados mediante un detector de ionización de flama (FID), que emite una señal de diferencia de potencial específico para cada componente y se representa visualmente en el cromatograma mediante la presencia de los diferentes picos. Se realizará la cromatografía de las muestras existentes más representativas, las mismas que se mencionan a continuación: aceite rojo de palma africana como materia prima, biodiesel de La Fabril (BLF), biodiesel de Palmar del Río (BPDR), diesel premium (DP), mezclas B5LF, B5PDR, B10LF y B10PDR.

7.2.1 Procedimientos de los ensayos para la caracterización de las diferentes muestras

Tabla 10. Procedimientos de los ensayos para la caracterización de muestras

N°	Ensayo	Método de ensayo	Procedimiento
1	Densidad a 15°C	ASTM D 287	<ul style="list-style-type: none">✓ Tomar un volumen de 1000 ml de la sustancia problema.✓ Introducir el hidrómetro adecuado y dejarlo que flote libremente sin que roce las paredes de la probeta.✓ Realizar la lectura de la densidad API y la temperatura de la muestra.✓ Realizar los cálculos para hacer la corrección de la densidad API a 60°F.
2	Punto de inflamación	ASTM D 93	<ul style="list-style-type: none">✓ Llenar la copa con la muestra problema hasta la línea de aforo indicada.

Tabla 10 (Continuación)

N°	Ensayo	Método de ensayo	Procedimiento
2	Punto de inflamación	ASTM D 93	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Iniciar el calentamiento, activar la agitación a 100rpm y regular la llama a 4mm. ✓ Cuando la muestra llegue a una temperatura de 30°C, hacer pasar la llama automáticamente cada 2°C hasta que se produzca la primera inflamación con una pequeña denotación. ✓ Apagar el equipo. ✓ Realizar los cálculos respectivos.
3	Φ Contenido de agua y sedimento	ASTM D 96	<ul style="list-style-type: none"> ✓ En dos tubos graduados se adicionan iguales volúmenes de xileno y la muestra. ✓ Adicionar 3 gotas de demulsificante en cada tubo. ✓ Someter los tubos a calentamiento mediante un baño maría a una temperatura de 50°C durante 5 min. ✓ Colocar los tubos en una centrífuga durante 15 min. ✓ Observar las distintas fases formadas, medir el volumen de agua y sedimentos.
4	Temperatura de destilación al 90% recuperado	ASTM D 86	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Colocar 100 ml de muestra en un balón de destilación con núcleos de ebullición. ✓ Armar el equipo, sellando herméticamente las uniones para evitar pérdida de vapores. ✓ Iniciar la destilación con un leve calentamiento. ✓ Registrar la temperatura cuando se condense la primera gota de destilado y cada 10% de volumen de destilado. ✓ Incrementar progresivamente el calentamiento de manera que exista un goteo de destilado constante hasta el 95% y el punto final. ✓ Apagar y desarmar el equipo. ✓ Dejar enfriar el balón y medir el volumen del residuo.
5	Viscosidad cinemática a 40°C	ASTM D 445	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Escoger el Viscosímetro Cannon-Fenske Routine adecuado según el tipo de muestra a analizarse. ✓ Verter un volumen de muestra en el viscosímetro hasta que las dos expansiones del mismo estén totalmente cubiertas. ✓ Tapar el orificio con un tapón de caucho. ✓ Colocar el viscosímetro en un baño térmico de aceite a 40°C durante 15 min. Luego retirar el tapón de caucho del orificio. ✓ Tomar el tiempo que tarda en fluir la muestra a través de las dos líneas señaladas en el viscosímetro.

Tabla 10 (Continuación)

N°	Ensayo	Método de ensayo	Procedimiento
5	Viscosidad cinemática a 40°C	ASTM D 445	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Realizar los cálculos respectivos de acuerdo a la norma.
6	W Contenido de azufre	ASTM D 4294	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Armar la celda correctamente. Colocar el plástico de manera que quede sin ninguna arruga. ✓ Verter la muestra en la celda hasta la línea de aforo y taparla. ✓ Introducir la celda en el equipo. ✓ Seleccionar la opción, nivel bajo y esperar. ✓ Imprimir el valor reportado. ✓ Retirar la celda del equipo.
7	Corrosión a la lámina de cobre	ASTM D 130	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Colocar la lámina de cobre en un soporte y lijar su superficie. ✓ Introducir la lámina de cobre en un tubo de ensayo que contenga la muestra a analizarse. ✓ Colocar el tubo tapado con un caucho en la cápsula metálica y enroscar su tapa. ✓ Colocar la cápsula metálica en un baño térmico a 50°C durante 3 horas. ✓ Retirar la cápsula del baño, extraer la lámina del tubo con una pinza y colocar sobre el estándar para obtener el valor de la corrosión según la coloración.
8	Índice de cetano calculado	ASTM D 976	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Realizar los ensayos: Destilación de productos del petróleo (Norma ASTM D86) y Densidad API (Norma ASTM D 287). ✓ Corregir la temperatura del 50% volumen de destilado. ✓ Corregir la densidad API a 60°F. ✓ Utilizar el nomograma que se encuentra en la norma o caso contrario la fórmula establecida en la misma.
9	Poder calórico calculado neto	ASTM D 240	<ul style="list-style-type: none"> ✓ En una cápsula de acero pesar 1 g de muestra. ✓ Hacer un arreglo a manera de trenza con un hilo fusible en el alambre de ignición. Verificar que exista el contacto entre el alambre, el hilo y la muestra. ✓ Colocar la tapa interna en el calorímetro poniendo seguro en la cavidad del calorímetro. Cerrar la tapa exterior del calorímetro. ✓ Colocar el nombre y peso de la muestra, la bomba a utilizarse, contenido de azufre. Iniciar la prueba. ✓ Registrar el poder calórico emitido.
10	Agua por destilación	ASTM D 95	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Verter 50 ml de la muestra y 50 ml de tolueno en un balón de destilación.

Tabla 10 (Continuación)

N°	Ensayo	Método de ensayo	Procedimiento
10	Agua por destilación	ASTM D 95	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Armar el equipo, colocando el balón en una fuente de calor y acoplándolo con una trampa de agua. ✓ Se inicia el calentamiento hasta ebullición, observando el incremento de agua en la trampa hasta tener un valor constante. ✓ Medir la cantidad de agua en el fondo de la trampa. ✓ Calcular el porcentaje de agua.
11	Cromatografía de gases	ASTM D2887	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Encender el equipo. ✓ Regular el flujo de los gases que se van a utilizar: hidrógeno y helio a las presiones adecuadas para que funcione el equipo. ✓ Pesar en un tubo de ensayo 0,2 g de muestra utilizando una balanza. Anotar el peso exacto. ✓ En el mismo tubo, pesar 5 g de solvente: Disulfuro de Carbono. Anotar el peso exacto. ✓ Tapar el tubo y agitar. ✓ Verter 1,5 ml de solución en un recipiente para el cromatógrafo. ✓ Introducir el recipiente en el cromatógrafo. ✓ Abrir el programa Simdis HT Online, llenar todos los datos requeridos de las muestras a analizar. Presionar Start. ✓ Esperar 40 min. para el análisis de cada muestra.
12	Absorción atómica (Análisis de metales)		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Realizar la digestión de las muestras, para lo cual se pesa en un crisol 10 g de muestra. ✓ Verter 5 ml de H_2SO_4. ✓ Dejar secar por completo en la plancha térmica. ✓ Someter el crisol a llama media 3 horas en la campana. ✓ Dejar 4 horas en la mufla a $800^{\circ}C$. ✓ Verter 20 ml de HNO_3 al 65%. ✓ Dejar secar en la plancha térmica. ✓ Lavar el crisol con 20 ml de HNO_3 al 20%. ✓ Filtrar y aforar la solución a 100 ml. ✓ Encender el equipo. ✓ Introducir la lámpara de cátodo hueco. Esperar a que se active de 5 – 10 min. ✓ Trazar 1 recta de calibración para el análisis. Determinar un coeficiente de correlación $R > 0,995$. ✓ Realizar la medición de concentración del metal determinado. Empezar con el blanco, luego con las demás muestras.

Nota: Ver las figuras del Anexo R. Diagrama del equipo de ensayos para la caracterización de muestras.

7.2.2 Caracterización mediante cromatografía gaseosa de la materia prima (aceite rojo de palma africana de *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis* (OxG) de Palmar del Río). La cromatografía de gases tiene como fundamento la migración diferencial de sustancias que se distribuyen entre dos fases. Además, es una herramienta analítica que se caracteriza por su rapidez, simplicidad instrumental y sensibilidad de detección.

En nuestro caso, como objeto de estudio, al no poseer estándares de ácidos grasos, sus ésteres correspondientes o sus respectivos glicéridos, se consideró su aplicación solo como una estrategia cualitativa para valorar el resultado del proceso de obtención de biodiesel en las condiciones reales de trabajo y la formación de mezclas con diesel.

El estudio cromatográfico sirve para valorar en condiciones reales la composición mayoritaria y la identificación preliminar (sobre la base del número de carbonos) de los grupos funcionales tipo: ácidos grasos y sus correspondientes ésteres de glicerilo: mono, di y triglicéridos (zonas específicas en el cromatograma cualitativo registrado).

El estudio composicional del aceite rojo de palma africana (OxG), extraído en la empresa Palmar del Río, se detalla en la Tabla 11; de acuerdo a ésta y conociendo teóricamente que los aceites estructuralmente son triglicéridos de ácidos grasos, se deduce que la composición mayoritaria del aceite corresponde a triglicéridos formados por los ácidos grasos palmítico y oléico, lo que justifica la representación cromatográfica en el Gráfico 3, al notar la presencia de picos más pronunciados en la zona 3.

Tabla 11. Composición química del aceite rojo de palma africana OxG

Ácidos grasos	Aceite OxG
Laurico C12:0	0.28
Mirístico C14:0	0.59
Palmítico C16:0	31.11
Esteárico C18:0	2.29
Oleico C18:1	52.74
Linoleico C18:1	12.69
Total saturados	34.27
Total Insaturados	65.43
Total	99.70

En el cromatograma representado en el Gráfico 3, se muestran las zonas características para cada estructura química y su tiempo de retención asociado, esta distribución zonal permite valorar el tipo de composición y evaluar el grado de extensión del proceso de transesterificación, además el rendimiento y la calidad del biodiesel generado.

Tabla 12. Zonas del cromatograma del aceite rojo de palma africana

Zona	Tiempo de retención (min)	# Carbonos	Componentes
1	6-9	19-24	Ácidos grasos + Monoglicéridos
2	12-17	29-48	Diglicéridos
3	18-22	49-66	Triglicéridos

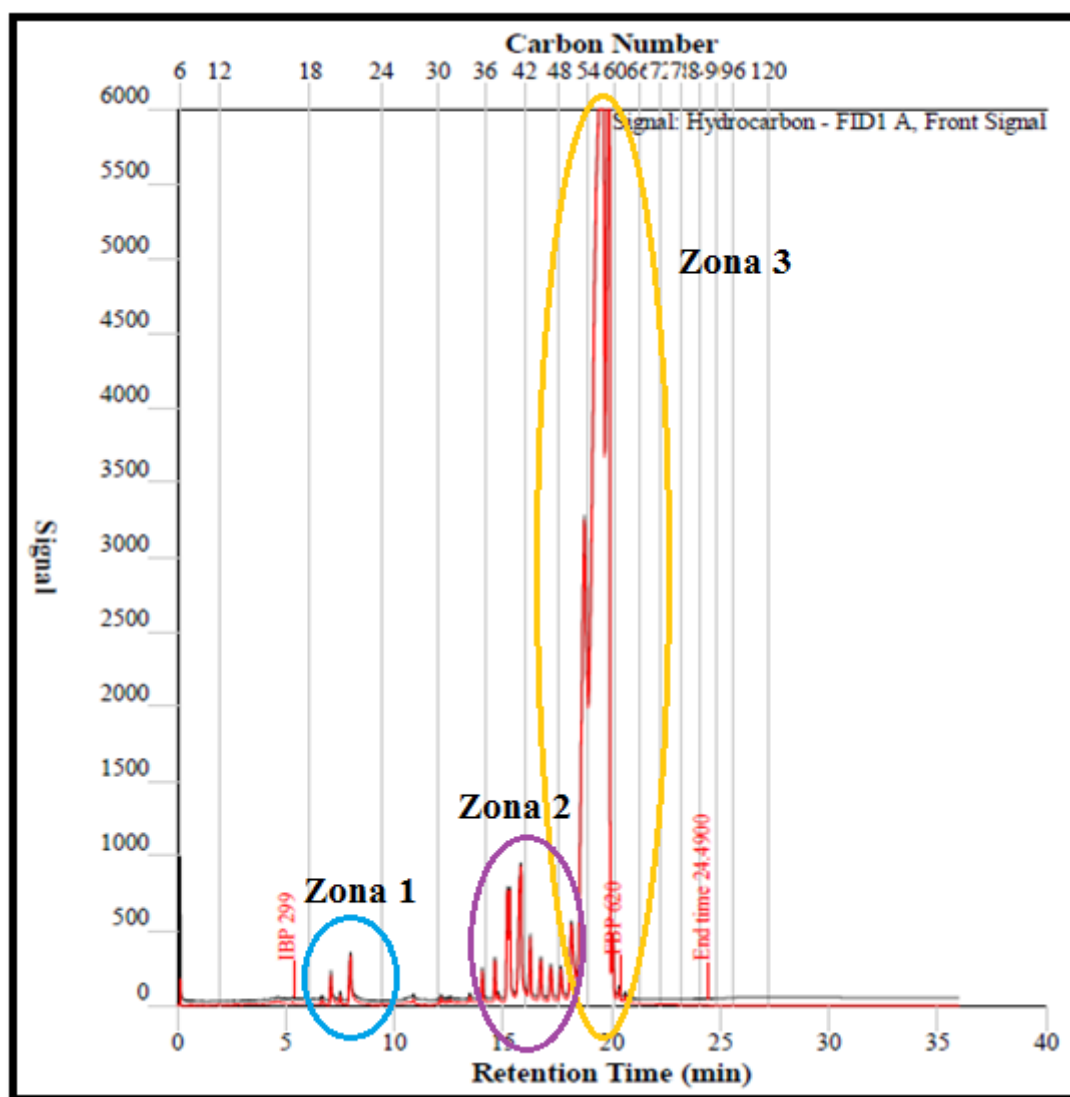


Gráfico 3. Cromatograma del aceite rojo de palma africana.

Señal=f(Tiempo de Retención)

7.2.3 Caracterización del biodiesel (B100). Se analizarán dos tipos de biodiesel producidos de diferente manera en dos empresas del Ecuador, La Fabril a escala industrial y Palmar del Río a nivel de laboratorio.

El biodiesel de La Fabril cumple con las especificaciones de la Norma ASTM D6751-2012 y corresponde al biocombustible que actualmente va a ser comercializado al 5% en mezcla con diesel premium.

Por otro lado, el biodiesel de Palmar del Río se lo obtiene a partir de aceite vegetal rojo de palma africana OxG, el mismo que no es sometido a ningún proceso de refinación posterior al de su correspondiente reacción de transesterificación.

Tabla 13. Caracterización del biodiesel de La Fabril y Palmar del Río de acuerdo a la Norma NTE INEN 2482-2009

N°	Ensayo	Unidad	NORMA		Biodiesel La Fabril	Biodiesel PDR	Método de ensayo
			Min.	Max.			
1	Densidad a 15°C	kg/m ³	860	900	875,31	900,4	ASTM D 287
2	Punto de inflamación	°C	120	---	130	90	ASTM D 93
3	φ Agua y sedimento	%	---	0,05	< 0,025	< 0,025	ASTM D 96
4	Contenido de agua	mg/kg	---	500	330,11	2991,13	ASTM D 95
5	Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	3,5	5	1,94	6,35	ASTM D 445
6	Contenido de azufre	%	---	0,02	0,0145	0,0155	ASTM D 4294
7	Corrosión lámina de cobre	Clasif.	---	3	1a	1a	ASTM D 130
8	Número de cetano*	---	49	---	48,56	39,71	ASTM D 976
9	Temp. de destilación al 90% recuperado	°C	---	360	337	339	ASTM D 86
10	Cont. metales alcal (Na + K)	mg/kg	---	5	0,62	1,09	EN 14108
11	Poder calórico	KJ/kg	---	---	39,3927	38,8681	ASTM D 240

*El Número de Cetano del biodiesel según la Norma NTE INEN 2482-2009 debe ser calculado mediante la aplicación de la Norma ASTM D 613 “Número de Cetano para el biodiesel”, sin embargo no se la aplicó debido a limitaciones relacionadas con los equipos necesarios para su

ejecución, por lo que se aplicó la Norma ASTM D 976 “Índice de Cetano calculado para Combustibles”, la misma que se utilizó para calcular el índice de cetano del diesel premium y sus mezclas con biodiesel, considerando la similitud en su composición química y su aplicación, permitiéndonos obtener un valor estimado de dicha propiedad en el biocombustible.

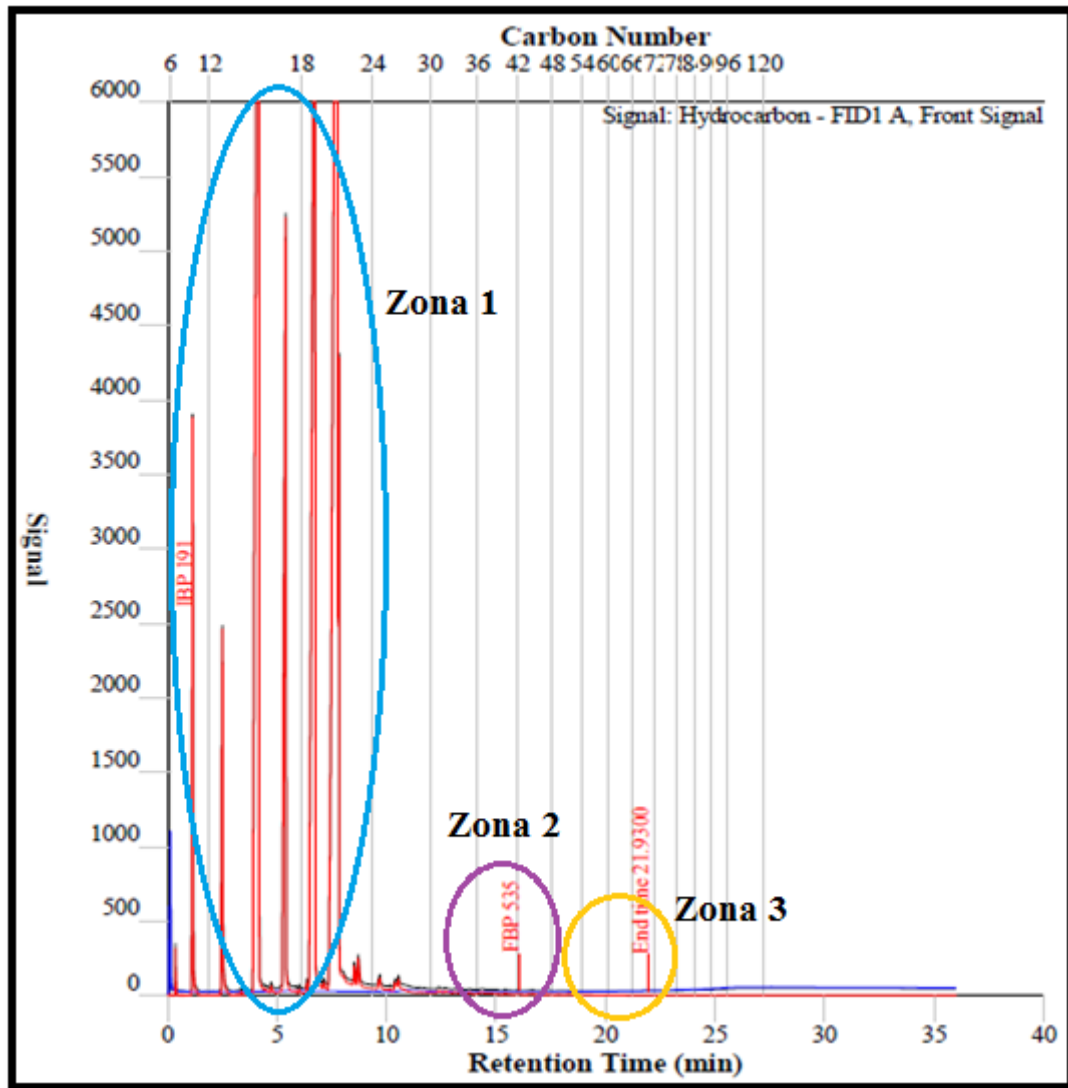


Gráfico 4. Cromatograma del Biodiesel de La Fabril. Señal=f(Tiempo de retención)

En el gráfico 4, puede observarse que en la zona 3 no existe la presencia de picos y en la zona 1 existe un incremento significativo de picos (# Carbonos= 6-22, tiempo de retención = 2-8 min), que avala cromatográficamente la generación de esteres metílicos de ácidos grasos correspondientes a ácido palmítico, oleico, esteárico, linoléico, entre otros.

Lo antes mencionado, se deduce debido a que la reacción de transesterificación se efectuó correctamente, cumpliendo con todos sus mecanismos, al no dejar triglicéridos de ácidos grasos

libres, sin reaccionar con su correspondiente molécula de metanol. (Ver Mecanismo de reacción para la obtención de biodiesel)

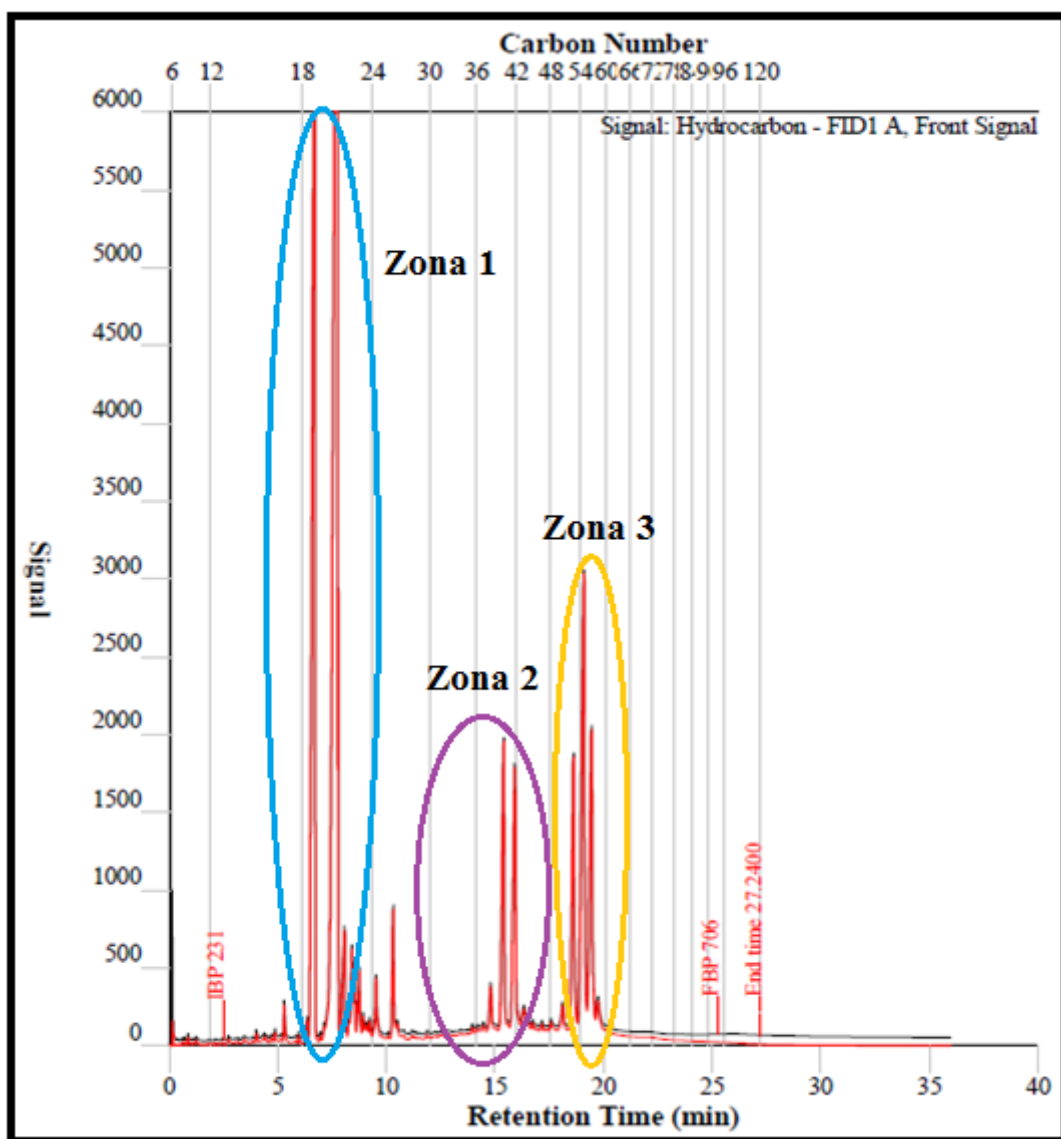


Gráfico 5. Cromatograma del Biodiesel de Palmar del Río. Señal= f (Tiempo de retención)

En el gráfico 5, se observa que aún existen componentes (picos) en la zona 3, no obstante la notoria disminución de las alturas y áreas correspondientes. Esto indica que aún existen triglicéridos y diglicéridos (*vide supra*) en las zonas sin reaccionar en el proceso de transesterificación con NaOH/CH₃OH. Este dato permite valorar preliminarmente que el biodiesel generado en las condiciones de esta empresa no tiene el mejor rendimiento ni eficiencia en comparación con el biodiesel de La Fabril, donde prácticamente la composición mayoritaria del biodiesel se localiza en la zona 1 típica para ésteres metílicos de ácidos grasos.

Este sencillo procedimiento analítico cualitativo sobre la base de # de carbonos y tiempo de retención permite evaluar la calidad del biodiesel generado en cada empresa productora a partir de materia prima de aceite de palma africana híbrida y la eficiencia de cada proceso de obtención; donde conceptual y metodológicamente el biodiesel de mejor calidad debe caracterizarse por una distribución mayoritaria de componentes en la zona 1 (ésteres metílicos de ácidos grasos) y prácticamente ninguna presencia de diglicéridos y triglicéridos (zonas 2 y 3 respectivamente).

7.2.4 Caracterización del diesel premium

Tabla 14. Caracterización del diesel premium (DP) de acuerdo a la Norma NTE INEN 1489:2012

N°	Ensayo	Unidad	NORMA		Diesel Premium	Método de ensayo
			Min.	Max.		
1	Densidad a 15°C	kg/m ³	---	---	826,2	ASTM D 287
2	Punto de inflamación	°C	51	---	62	ASTM D 93
3	Φ Contenido de agua y sedimento	%	---	0,05	< 0,025	NTE INEN 1494 ASTM D 96
4	Temperatura de destilación al 90% recup.	°C	---	360	325	NTE INEN D 926 ASTM D 86
5	Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	2	5	2,65	NTE INEN 810 ASTM D 445
6	W Contenido de azufre	%	---	0,05	0,0181	NTE INEN 1490 ASTM D 4294
7	Corrosión a la lámina de cobre	Clasif.	---	3	1a	NTE INEN 927 ASTM D 130
8	Índice de cetano calculado	---	45	---	52,97	NTE INEN 1495 ASTM D 976
9	Contenido de biodiesel, (φ Biodiesel)	%	---	5	0	EN 14078
10	Poder calórico	KJ/kg	---	---	45,9246	ASTM D 240

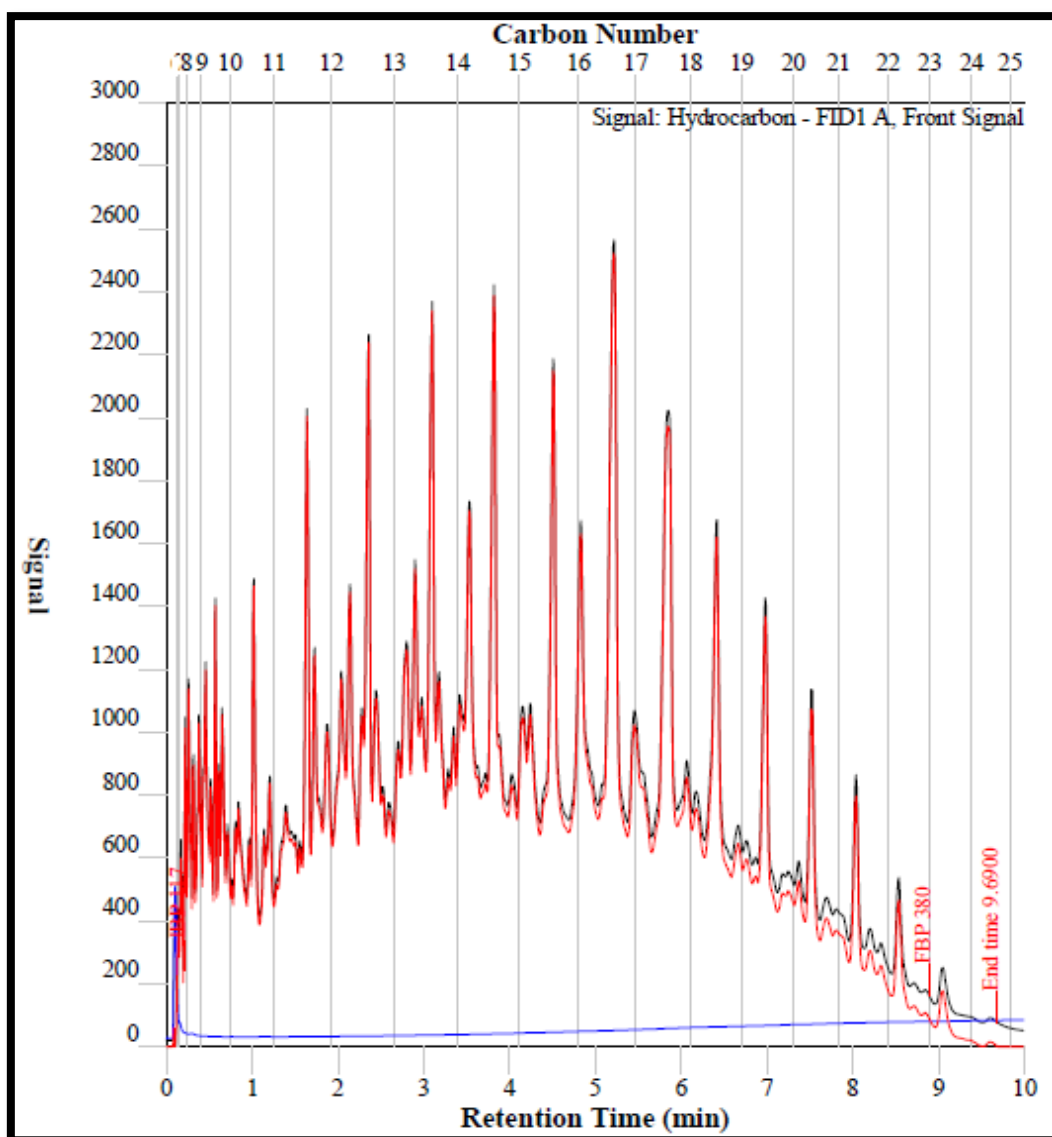


Gráfico 6. Cromatograma del Diesel Premium. Señal= f (Tiempo de Retención)

El cromatograma registrado revela la composición multicomponente de este tipo de combustible, siendo los componentes más representativos con # carbonos entre 10 y 21.

7.2.5 Caracterización de mezclas diesel-biodiesel. Se prepararon mezclas de diesel con biodiesel en diferentes proporciones en volumen producidos en las empresas La Fabril y en Palmar del Río. Las mezclas B2 y B5 se efectuaron según la Norma de la Tabla 4 y para las mezclas B8, B10 y B15 se realizaron los ensayos según la Norma de la Tabla 5.

7.2.5.1 Caracterización de mezclas diesel-biodiesel (La Fabril)

Tabla 15. Caracterización de mezclas B2, B5 (LF). Según la Norma NTE INEN 1489:2012

N°	Ensayo	Unidad	NORMA		B2	B5	Método de ensayo
			Min.	Max.			
1	Densidad a 15°C	kg/m ³	---	---	834,49	835,48	ASTM D 287
2	Punto de inflamación	°C	51	---	63	65	INEN 1493 Procedimiento A ASTM D 93
3	Φ Contenido de agua y sedimento	%	---	0,05	< 0,025	< 0,025	NTE INEN 1494 ASTM D 96
4	Temperatura de destilación al 90% recuperado	°C	---	360	330	330	NTE INEN D 926 ASTM D 86
5	Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	2	5	2,86	2,90	NTE INEN 810 ASTM D 445
6	W Contenido de azufre	%	---	0,05	0,0176	0,0152	NTE INEN 1490 ASTM D 4294
7	Corrosión a la lámina de cobre	Clasificación	---	3	1a	1a	NTE INEN 927 ASTM D 130
8	Índice de cetano calculado	---	45	---	52,52	52,60	NTE INEN 1495 ASTM D 976
9	Contenido de biodiesel, (φ Biodiesel)	%	---	5	2	5	EN 14078
10	Poder calórico	KJ/kg	---	---	45,6406	45,4859	ASTM D 240

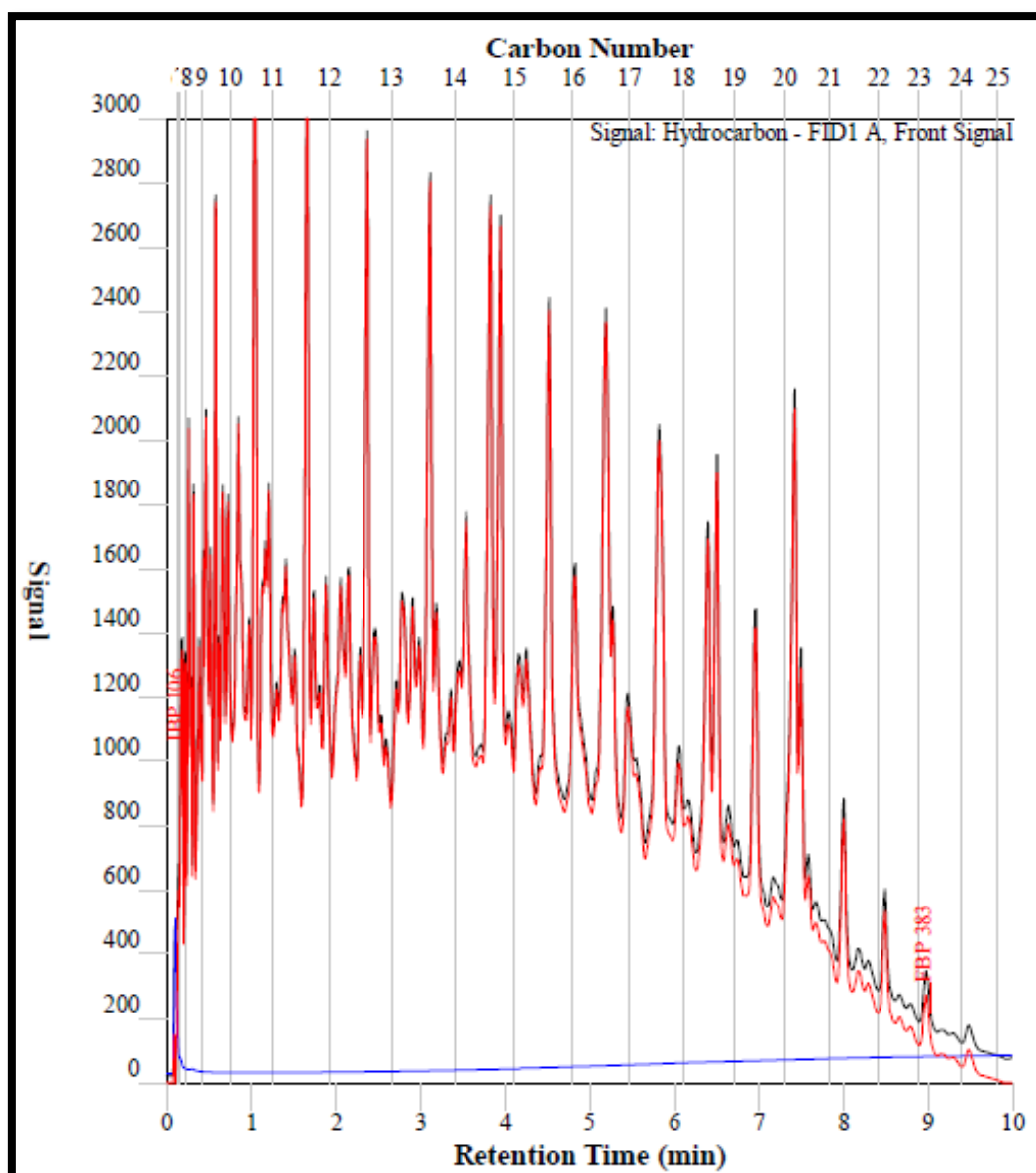


Gráfico 7. Cromatograma de la mezcla B5LF. Señal= f (Tiempo de retención)

El análisis cromatográfico de la mezcla B5LF, la misma que se comercializará a partir de Marzo del 2014, revela los picos característicos para biodiesel en C_{14} - $C_{15/16}$, C_{18} - $C_{19/22}$ con potencial significación analítica.

Tabla 16. Caracterización de mezclas B8, B10, B15 (LF). Según la Norma ASTM D7467-10

N°	Ensayo	Unidad	NORMA		B8	B10	B15	Método de ensayo
			Min.	Max.				
1	Densidad a 15°C	kg/m ³	---	---	836,47	837,46	839,45	ASTM D 287
2	Punto de inflamación	°C	52	---	67	68	72	INEN 1493 Procedimiento A ASTM D 93
3	Φ Contenido de agua y sedimento	%	---	0,05	< 0,025	< 0,025	< 0,025	NTE INEN 1494 ASTM D 96
4	Temperatura de destilación al 90% recuperado	°C	---	360	328	328	323	NTE INEN D 926 ASTM D 86
5	Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	2	5	2,97	3,00	3,16	NTE INEN 810 ASTM D 445
6	W Contenido de azufre	%	---	0,05	0,0149	0,0163	0,0142	NTE INEN 1490 ASTM D 4294
7	Corrosión a la lámina de cobre	Clasif.	---	3	1a	1a	1a	NTE INEN 927 ASTM D 130
8	Índice de cetano calculado	---	45	---	51,61	52,12	51,84	NTE INEN 1495 ASTM D 976
9	Contenido de biodiesel, (φ Biodiesel)	%	6	20	8	10	15	EN 14078
10	Poder calórico	KJ/kg	---	---	45,2942	45,1200	44,8577	ASTM D 240

7.2.5.2 Caracterización de mezclas diesel-biodiesel (Palmar del Río)

Tabla 17. Caracterización de mezclas B2, B5 (PDR). Según la Norma NTE INEN 1489:2012

N°	Ensayo	Unidad	NORMA		B2	B5	Método de ensayo
			Min.	Max.			
1	Densidad a 15°C	kg/m ³	---	---	827,17	829,6	ASTM D 287
2	Punto de inflamación	°C	51	---	62	63	INEN 1493 Procedimiento A ASTM D 93
3	Φ Contenido de agua y sedimento	%	---	0,05	< 0,025	< 0,025	NTE INEN 1494 ASTM D 96
4	Temperatura de destilación al 90% recuperado	°C	---	360	335	328	NTE INEN D 926 ASTM D 86
5	Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	2	5	2,29	2,35	NTE INEN 810 ASTM D 445
6	W Contenido de azufre	%	---	0,05	0,0179	0,0158	NTE INEN 1490 ASTM D 4294
7	Corrosión a la lámina de cobre	Clasif.	---	3	1a	1a	NTE INEN 927 ASTM D 130
8	Índice de cetano calculado	---	45	---	51,05	52,20	NTE INEN 1495 ASTM D 976
9	Contenido de biodiesel, (φ Biodiesel)	%	---	5	2	5	EN 14078
10	Poder calórico	KJ/kg	---	---	45,5846	45,3361	ASTM D 240

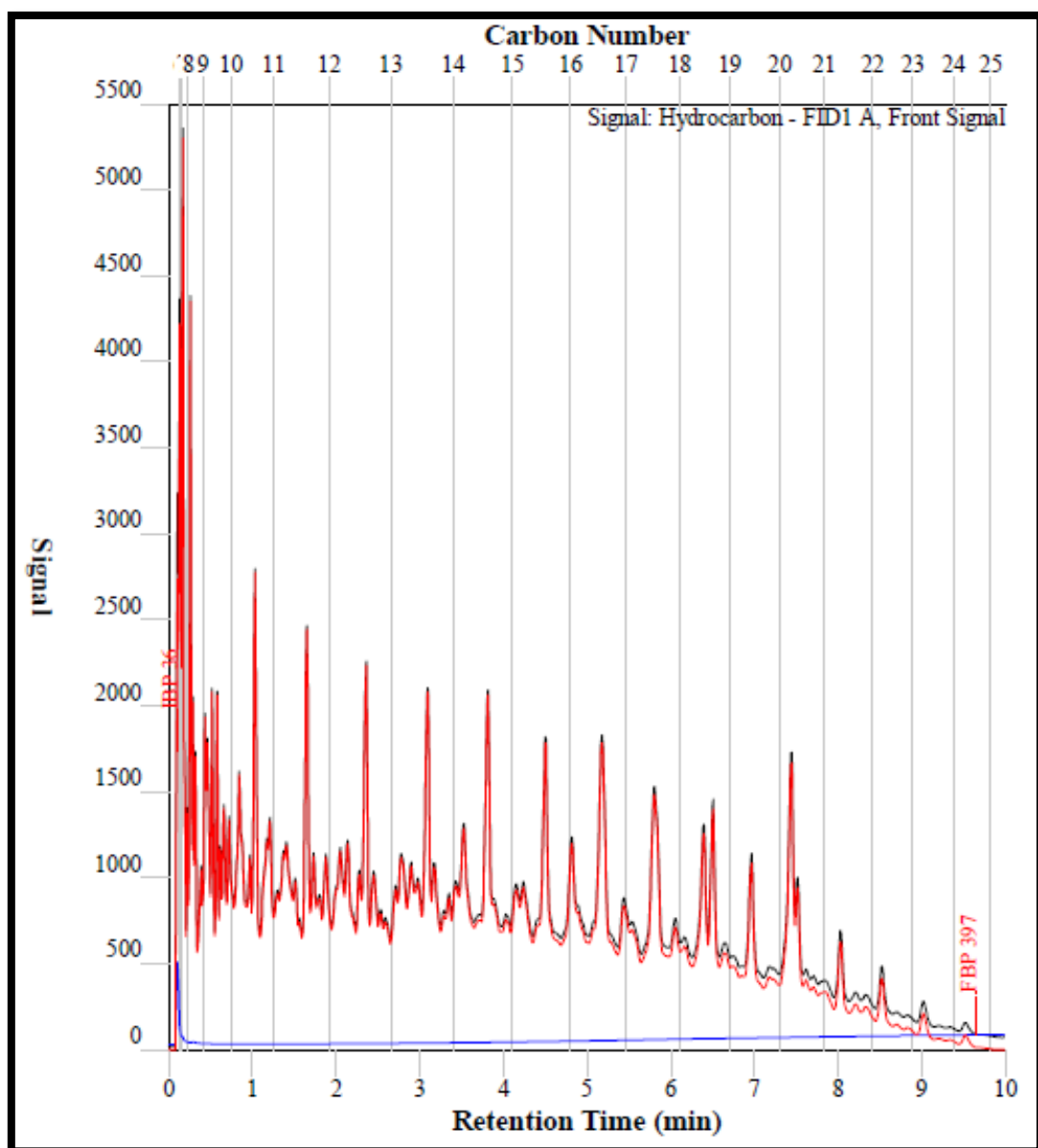


Gráfico 8. Cromatograma de la mezcla B5PDR. Señal= f (Tiempo de retención)

Para este caso, considerando los planteamientos previos se observa un incremento de la intensidad de los picos para C_6 - $C_{8/9}$ y C_{18} , fenómeno asociado al patrón composicional del biodiesel de partida. (Ver Gráfico 5)

Tabla 18. Caracterización de mezclas B8, B10, B15 (PDR). Según la Norma ASTM D7467-10

N°	Ensayo	Unidad	NORMA		B8	B10	B15	Método de ensayo
			Min.	Max.				
1	Densidad a 15°C	kg/m ³	---	---	831,06	833,02	836,96	ASTM D 287
2	Punto de inflamación	°C	52	---	64	65	66	INEN 1493 Procedimiento A ASTM D 93
3	Φ Contenido de agua y sedimento	%	---	0,05	< 0,025	< 0,025	< 0,025	NTE INEN 1494 ASTM D 96
4	Temperatura de destilación al 90% recuperado	°C	---	360	327	327	322	NTE INEN D 926 ASTM D 86
5	Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	2	5	2,53	2,68	2,93	NTE INEN 810 ASTM D 445
6	W Contenido de azufre	%	---	0,05	0,0161	0,0173	0,0156	NTE INEN 1490 ASTM D 4294
7	Corrosión a la lámina de cobre	Clasif.	---	3	1a	1a	1a	NTE INEN 927 ASTM D 130
8	Índice de cetano calculado	---	45	---	51,43	49,99	51,22	NTE INEN 1495 ASTM D 976
9	Contenido de biodiesel, (φ Biodiesel)	%	6	20	8	10	15	EN 14078
10	Poder calórico	KJ/kg	---	---	45,1361	44,9115	44,7893	ASTM D 240

7.3 Emisiones contaminantes

El análisis de emisiones gaseosas provocadas por fuentes móviles al consumir combustibles como diesel y mezclas diesel-biodiesel resulta ser de gran importancia, ya que nos permite determinar el grado de contaminación que producen estos combustibles en la atmósfera. Así, mediante el uso del equipo OEM 2100 MONTANA se determinó las concentraciones de NO_x, HC, CO, CO₂ y material particulado (PM).

Actualmente, en Ecuador, en las revisiones vehiculares sólo se analiza la opacidad de los gases emitidos por el tubo de escape de las fuentes móviles, pero no se cuantifica las concentraciones de las emisiones contaminantes, sin embargo, se busca comprobar la reducción de gases utilizando nuevos combustibles como mezclas diesel-biodiesel en varias proporciones, buscando sustituir parcialmente el uso de diesel premium.

Adicionalmente, se realizará un análisis estadístico mediante pruebas de significancia t y F, para conocer si los valores obtenidos de emisiones contaminantes tienen o no diferencia significativa.

7.3.1 Características del vehículo. Las pruebas para la medición de emisiones contaminantes al utilizar los combustibles preparados, se realizaron con un vehículo que usa como combustible diesel, el que es de propiedad de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador.

Tabla 19. Características del vehículo para medir emisiones contaminantes

Vehículo Tipo	Furgón
Marca	Chevrolet
Modelo	NHR
Año	2001
Cilindraje	3200 cc
Combustible	Diesel
Placa	PEN-0501

7.3.2 Características del equipo OEM 2100 MONTANA. El equipo OEM 2100 MONTANA, de propiedad de la Secretaría de Ambiente, está constituido por un sistema portátil de monitoreo de emisiones, el mismo que nos permite obtener la concentración de los principales contaminantes provocados por la utilización de diferentes combustibles en fuentes móviles, tales

como: HC, CO, CO₂, NO_x, PM; en tiempo real de forma estática mediante una simulación de trayectoria dinámica.

Entendiéndose como simulación de trayectoria dinámica un recorrido que realiza el vehículo con aumento y disminución de velocidad y aceleración en un tiempo aproximado de 4 minutos.

Tabla 20. Características del equipo OEM 2100 MONTANA para medir emisiones contaminantes

Gas	Rango de medición	Unidades	Precisión	Resolución	Tipo de medida
HC	0-4000	ppm	±8 ppm	1ppm	NDIR*
CO	0,00-10,000	%	±0,02%	0,001%	NDIR
CO ₂	0,00-16,00	%	±0,3%	0,01%	NDIR
NO _x	0-4000	ppm	±25 ppm	1ppm	Celda electroquímica
PM	0,000-100	mg/m ³	±0,001	0,001	NDIR

* **NDIR:** Non Dispersive Infrared Detector

7.3.3 Procedimiento para utilizar el equipo OEM 2100 MONTANA

- ✓ Armar el equipo OEM 2100 MONTANA y hacer todas las conexiones necesarias adaptando los cables al vehículo que se va a utilizar para la medición. Realizar las instalaciones correspondientes del vehículo en el dinamómetro.
- ✓ Encender el ordenador del equipo OEM 2100 MONTANA 30 minutos antes de la medición.
- ✓ Introducir en el software los datos del vehículo que se va a utilizar. Establecer la marca, año, modelo, cilindraje, etc.
- ✓ Encender la bomba A y B para el análisis de emisiones.
- ✓ Introducir en el software el tipo de combustible que consume el vehículo, potencia máxima y las establecer las revoluciones por minuto con el sensor transmisor.
- ✓ Colocar los sensores de temperatura y presión en el motor.
- ✓ Introducir las sondas de muestreo en el tubo de escape del vehículo.
- ✓ Adaptar las mangueras de admisión y recirculación del tanque de combustible, de manera que el vehículo consuma las muestras combustibles a ser analizadas.
- ✓ Encender el motor.

- ✓ Iniciar la prueba de medición de emisiones, la misma que tiene una duración de 4 minutos, obteniéndose valores de concentración de gas o material particulado (PM) por cada segundo transcurrido.
- ✓ Parar la prueba una vez que la simulación dinámica haya terminado.
- ✓ Apagar el vehículo.
- ✓ Guardar los datos obtenidos en el programa.
- ✓ Repetir el mismo procedimiento 3 veces por cada combustible.

Nota: Las muestras combustibles son: Diesel Premium, Biodiesel de La Fabril (BLF), Biodiesel de Palmar del Río (BPDR) y sus correspondientes mezclas B5 y B10.

Observar los equipos e implementos necesarios para ejecutar el procedimiento antes detallado.
(Ver Anexo S)

7.3.4 Datos obtenidos de las emisiones contaminantes. Los valores determinados por el equipo OEM 2100 MONTANA, representan la concentración de las emisiones contaminantes como: Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Hidrocarburos no combustionados (HC), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂) y material particulado (PM).

Es importante aclarar que el equipo OEM 2100 MONTANA, mide y genera valores de las concentraciones de las emisiones contaminantes cada segundo durante los 4 minutos que tarda cada prueba en ejecutarse, por lo que por facilidad de cálculos y debido al suficiente número de datos, se tomará un promedio en las mediciones de concentraciones cada 10 segundos en los 4 minutos de prueba, teniendo 24 valores de concentraciones por cada prueba realizada.

Se realizó 3 pruebas para cada sistema, es decir, se probó 3 veces el mismo combustible en la fuente móvil.

La prueba 1, prueba 2 y prueba 3, se encuentran representadas en las tablas siguientes por los números 1, 2 y 3 respectivamente.

Tabla 21. Emisiones contaminantes del diesel premium (DP)

Tiempo (s)	NOx [ppm]			HC[ppm]			CO [%]			CO ₂ [%]			PM [mg/m3]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	85	92	89	18	17	15	0.061	0.053	0.037	1.92	1.89	1.81	0.401	0.129	0.098
10	128	130	135	19	19	16	0.073	0.067	0.049	3.87	3.7	3.42	2.183	0.732	0.621
20	223	227	233	19	20	16	0.066	0.068	0.05	5.47	5.18	5.38	2.087	0.418	0.223
30	234	210	225	14	15	13	0.9082	0.079	0.064	4.03	3.35	3.95	0.231	0.052	0.045
40	384	381	376	13	14	9	0.08	0.077	0.063	3.91	3.81	3.48	0.258	0.016	0.105
50	523	519	512	13	14	9	0.09	0.088	0.065	4.93	4.87	4.11	1.031	2.548	0.195
60	517	515	509	10	9	7	0.07	0.058	0.046	5.62	5.5	5.51	0.636	0.268	0.285
70	566	546	552	11	7	9	0.066	0.055	0.04	5.36	5.28	5.17	0.277	0.2	0.083
80	571	556	576	12	13	10	0.067	0.051	0.039	5.31	5.22	5.15	0.348	0.192	0.112
90	548	531	541	12	13	10	0.053	0.048	0.034	3.27	3.16	2.99	0.164	0.099	0.068
100	402	419	407	10	8	9	0.049	0.05	0.034	3.94	4.13	3.86	0.140	0.190	0.170
110	415	402	408	8	5	7	0.085	0.077	0.057	4.16	3.99	4.55	3.944	0.644	1.609
120	389	399	386	9	6	5	0.08	0.072	0.058	2.83	2.72	2.59	0.378	0.176	0.21
130	381	375	377	10	11	8	0.086	0.077	0.064	4.52	4.63	3.9	0.231	0.098	0.201
140	281	272	267	11	8	10	0.091	0.087	0.068	4.63	4.63	4.14	0.210	0.276	0.27
150	320	338	329	12	13	11	0.078	0.073	0.057	4.64	4.64	4.63	1.127	4.03	0.758
160	376	362	352	12	12	11	0.075	0.068	0.047	5.81	5.3	5.75	0.489	0.827	0.712
170	615	628	603	12	12	10	0.051	0.55	0.044	5.46	5.56	5.22	5.727	1.273	3.944
180	638	637	644	9	8	7	0.044	0.041	0.038	4.93	4.94	4.83	4.24	1.109	1.647
190	606	593	596	13	12	12	0.039	0.032	0.033	4.92	5.08	5.02	7.015	3.024	4.043
200	595	589	590	13	12	11	0.03	0.023	0.029	5.14	5.1	5.04	10.139	5.664	6.078
210	589	580	588	13	11	9	0.028	0.019	0.029	4.83	4.94	4.37	13.001	8.724	8.44
220	500	497	487	9	10	8	0.024	0.018	0.026	4.58	4.61	4.82	16.035	11.184	11.554
230	344	332	338	10	8	10	0.022	0.025	0.022	1.29	1.33	1.42	12.838	9.748	9.629

Tabla 22. Emisiones contaminantes del biodiesel de La Fabril (BLF)

Tiempo (s)	NOx [ppm]			HC [ppm]			CO [%]			CO ₂ [%]			PM [mg/m3]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	60	59	57	0	0	1	0.018	0.02	0.014	0.83	0.72	0.73	0.163	0.089	0.237
10	107	104	125	0	0	2	0.023	0.023	0.02	2.42	1.62	2.24	1.452	0.85	0.921
20	247	138	225	0	3	2	0.031	0.03	0.024	2.6	2.48	2.54	0.345	0.129	0.138
30	116	109	122	0	2	6	0.041	0.039	0.035	1.73	2.1	1.79	0.123	0.028	0.1
40	189	177	156	0	0	6	0.045	0.039	0.036	2.65	2.1	2.09	0.099	0.097	0.034
50	260	256	207	0	2	5	0.043	0.048	0.039	2.66	2.74	2.36	0.949	0.193	0.571
60	254	245	216	0	1	5	0.035	0.036	0.031	2.83	2.79	2.74	0.152	0.158	0.061
70	264	251	241	0	1	2	0.033	0.031	0.029	2.75	2.56	2.56	0.196	0.127	0.047
80	314	303	259	0	0	3	0.033	0.031	0.03	2.73	2.62	2.61	0.119	0.062	0.193
90	204	196	200	0	0	4	0.032	0.025	0.026	1.87	1.38	1.57	0.111	0.078	0.101
100	111	101	101	0	0	3	0.026	0.021	0.021	1.9	2.09	1.99	0.129	0.196	0.311
110	402	392	380	0	0	6	0.03	0.027	0.024	3.82	3.47	3.24	0.322	0.263	0.217
120	207	193	186	0	1	5	0.036	0.033	0.033	1.99	2.05	2.39	0.145	0.068	0.13
130	237	248	266	0	2	6	0.043	0.041	0.038	2.53	2.44	2.27	0.063	0.106	0.004
140	159	166	170	0	3	4	0.049	0.048	0.041	2.54	3.78	2.44	0.081	0.242	0.04
150	186	195	224	0	2	5	0.043	0.047	0.043	1.78	3.15	3.2	0.163	0.169	0.065
160	256	248	265	0	4	5	0.035	0.047	0.048	4.02	3.29	4.42	0.174	0.784	0.829
170	518	501	494	0	3	4	0.033	0.033	0.034	4.68	4.8	4.71	1.64	0.555	0.47
180	469	459	489	0	1	8	0.029	0.028	0.029	4.56	4.69	4.91	1.115	0.511	0.644
190	476	462	439	0	0	7	0.025	0.023	0.023	4.75	4.88	4.88	2.538	1.754	1.499
200	460	455	410	0	0	6	0.021	0.021	0.021	4.9	4.82	4.72	3.08	2.386	1.768
210	443	433	430	0	0	5	0.02	0.02	0.021	4.49	4.51	4.57	2.715	2.125	1.966
220	454	442	418	0	2	4	0.019	0.019	0.02	4.69	4.67	4.63	3.095	3.057	2.579
230	272	266	160	1	0	5	0.02	0.019	0.018	1.22	0.92	0.74	2.214	2.748	1.43

Tabla 23. Emisiones contaminantes de la mezcla B5LF (La Fabril)

Tiempo (s)	NOx [ppm]			HC [ppm]			CO [%]			CO ₂ [%]			PM [mg/m3]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	70	47	51	0	0	3	0.029	0.024	0.026	0.84	0.8	0.85	0.092	0.133	0.12
10	219	83	64	1	0	2	0.035	0.032	0.033	3.94	2.54	2.23	0.293	0.557	0.546
20	252	189	171	1	0	2	0.043	0.035	0.039	2.55	2.64	2.6	0.203	0.065	0.059
30	166	130	128	2	0	2	0.055	0.05	0.051	2.6	2.64	2.59	0.194	0.036	0.031
40	181	209	193	4	3	1	0.052	0.047	0.048	1.82	2.24	1.98	0.027	0.141	0.14
50	242	281	272	3	2	5	0.051	0.049	0.05	2.43	2.66	2.59	0.225	0.223	0.22
60	298	265	274	2	1	2	0.039	0.035	0.037	3.18	3.04	3.27	0.23	0.019	0.017
70	315	291	298	3	2	2	0.036	0.032	0.033	3.03	2.96	3.1	0.131	0.121	0.119
80	335	309	328	0	2	1	0.039	0.031	0.032	3.02	2.96	3.07	0.092	0.235	0.231
90	188	250	248	1	2	1	0.035	0.028	0.03	1.17	1.38	1.26	0.139	0.113	0.103
100	131	98	86	0	1	0	0.029	0.023	0.024	3.51	3.37	3.65	0.422	0.057	0.049
110	343	268	313	4	3	0	0.04	0.034	0.033	3.83	3.6	3.9	0.347	0.393	0.301
120	148	187	186	6	6	3	0.049	0.044	0.042	1.67	1.83	1.78	0.077	0	0.032
130	227	269	277	6	6	3	0.057	0.05	0.048	2.36	2.53	2.48	0.072	0.143	0.139
140	188	247	215	4	3	4	0.062	0.056	0.054	2.7	2.76	2.63	0.293	0.241	0.238
150	179	290	226	5	5	4	0.061	0.057	0.056	2.5	3.65	3.47	1.11	0.155	0.141
160	338	327	340	6	5	7	0.06	0.056	0.055	5.53	3.79	3.43	0.928	0.529	0.506
170	580	521	543	7	6	6	0.049	0.042	0.041	4.76	5.51	5.65	0.993	1.622	1.63
180	556	510	538	7	8	6	0.039	0.035	0.033	4.79	4.57	4.62	1.1	0.835	0.841
190	507	524	538	8	9	7	0.033	0.03	0.029	4.81	4.73	4.74	2.492	2.391	2.421
200	507	507	522	9	6	5	0.03	0.025	0.023	4.81	4.72	4.83	4.968	3.799	3.81
210	548	513	558	10	8	5	0.029	0.025	0.022	4.69	4.52	4.64	6.213	5	5.032
220	459	478	401	9	10	4	0.027	0.022	0.022	4	4.29	4.28	6.872	6.167	6.171
230	178	274	235	8	9	5	0.026	0.023	0.021	0.62	1.16	1.02	4.431	4.991	5.029

Tabla 24. Emisiones contaminantes de la mezcla B10LF (La Fabril)

Tiempo (s)	NOx [ppm]			HC [ppm]			CO [%]			CO ₂ [%]			PM [mg/m3]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	68	49	49	0	2	1	0.029	0.027	0.028	0.83	0.81	0.79	0.214	0.173	0.168
10	115	102	88	2	3	2	0.042	0.041	0.038	3.7	3.6	1.9	0.994	0.753	0.739
20	219	195	260	3	5	4	0.046	0.045	0.044	2.86	2.74	2.75	0.431	0.368	0.381
30	136	112	111	6	4	5	0.064	0.061	0.063	1.92	1.87	1.89	0.221	0.27	0.228
40	209	197	200	6	4	5	0.06	0.057	0.059	2.54	2.47	2.18	0.233	0.184	0.229
50	295	286	252	5	4	2	0.063	0.053	0.062	2.83	2.68	2.76	0.241	0.258	0.262
60	301	291	273	3	2	1	0.047	0.04	0.045	3.36	3.17	3.18	0.161	0.147	0.158
70	341	333	253	1	1	2	0.043	0.039	0.042	3.23	3.09	2.78	0.272	0.285	0.276
80	312	306	328	0	3	2	0.044	0.04	0.043	3.24	3.03	3.12	0.097	0.086	0.084
90	251	242	230	1	0	1	0.038	0.037	0.037	1.99	1.86	2.05	0.028	0.029	0.035
100	111	108	82	2	0	0	0.033	0.032	0.028	1.61	1.51	1.13	0.192	0.164	0.168
110	460	454	456	4	3	2	0.044	0.043	0.035	4.62	4.51	4.52	1.282	1.198	1.274
120	179	160	161	5	3	4	0.054	0.053	0.047	2.04	1.96	1.61	0.137	0.119	0.128
130	411	400	260	4	2	3	0.065	0.064	0.058	2.93	2.86	2.84	0.082	0.072	0.078
140	275	268	200	5	4	3	0.074	0.072	0.065	3.04	2.91	3.04	0.239	0.217	0.225
150	317	305	258	5	5	6	0.073	0.072	0.069	4.02	3.99	3.35	0.231	0.263	0.267
160	408	399	367	7	5	6	0.072	0.069	0.071	5.46	5.38	4.91	1.812	1.916	1.897
170	641	632	643	8	3	5	0.049	0.044	0.048	4.84	4.63	4.72	1.283	1.156	1.147
180	594	587	528	8	4	5	0.041	0.037	0.04	4.92	4.83	4.49	1.291	1.182	1.224
190	542	532	528	6	5	4	0.035	0.032	0.034	4.93	4.72	4.87	2.385	2.482	2.346
200	542	532	510	7	7	6	0.031	0.029	0.03	4.92	4.8	4.88	3.723	3.883	3.752
210	490	487	482	9	7	7	0.031	0.029	0.03	4.82	4.42	4.71	4.792	4.594	4.692
220	491	482	490	6	7	7	0.028	0.027	0.027	4.64	4.35	4.51	5.994	5.848	5.855
230	318	291	360	6	6	5	0.03	0.029	0.027	1.84	1.77	1.75	3.678	3.764	3.532

Tabla 25. Emisiones contaminantes del biodiesel de Palmar del Río (BPDR)

Tiempo (s)	NOx [ppm]			HC [ppm]			CO [%]			CO ₂ [%]			PM [mg/m3]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	45	56	57	0	0	0	0.023	0.016	0.021	0.73	0.77	1.34	1.748	1.693	1.886
10	72	131	97	0	0	0	0.035	0.033	0.029	3.06	2.66	2.49	1.198	1.016	1.158
20	211	259	232	0	0	0	0.033	0.027	0.03	2.63	2.52	1.6	0.573	0.581	0.577
30	117	160	134	0	0	0	0.042	0.039	0.038	1.82	2.13	2.5	0.748	0.549	0.663
40	207	153	235	0	0	0	0.048	0.041	0.046	2.37	2.05	4.41	0.952	1.112	0.991
50	237	278	167	0	0	1	0.05	0.051	0.044	2.7	3.88	2.5	0.476	0.478	0.474
60	255	194	279	0	0	2	0.046	0.044	0.039	2.17	1.68	2.52	0.449	0.233	0.245
70	213	236	233	0	0	1	0.041	0.038	0.038	2.4	2.78	2.6	0.518	0.665	0.642
80	207	232	219	0	0	2	0.039	0.037	0.037	2.73	2.59	1.84	0.38	0.41	0.465
90	136	150	158	0	0	0	0.033	0.034	0.027	1.66	1.71	0.44	0.242	0.413	0.327
100	65	99	85	0	0	0	0.049	0.03	0.039	1.25	2.34	3.61	0.854	1.181	1.085
110	296	327	312	0	0	0	0.037	0.038	0.035	3.88	3.17	2.71	0.498	0.522	0.4
120	152	134	167	0	0	0	0.042	0.041	0.039	2.59	1.48	2.08	0.691	0.916	0.845
130	255	182	165	0	0	0	0.054	0.043	0.043	2.44	2.12	2.01	0.619	0.814	0.708
140	187	194	199	0	0	0	0.052	0.051	0.046	2.34	2.93	2.91	0.53	0.424	0.325
150	199	178	208	0	0	0	0.054	0.05	0.051	3.08	2.86	4.43	0.389	0.388	0.217
160	272	277	286	0	0	0	0.051	0.055	0.04	4.6	6.19	5.21	0.319	0.84	0.732
170	526	493	534	0	0	0	0.048	0.039	0.031	5.25	4.65	4.43	0.206	0.328	0.257
180	463	456	471	0	0	0	0.036	0.032	0.026	4.79	4.64	4.87	0.458	0.518	0.465
190	450	411	440	0	0	0	0.032	0.027	0.023	4.87	4.66	4.83	1.018	0.912	1.111
200	431	407	426	0	0	0	0.03	0.023	0.022	4.85	4.71	3.85	1.859	1.386	1.209
210	403	418	411	0	0	0	0.031	0.023	0.021	4.53	4.5	4.73	1.844	1.622	1.564
220	439	416	360	0	0	0	0.02	0.021	0.022	4.66	4.63	2.76	2.416	1.73	1.669
230	263	136	46	0	0	0	0.011	0.016	0.013	1.68	0.51	0.28	1.515	1.054	0.982

Tabla 26. Emisiones contaminantes de la mezcla B5PDR (Palmar del Río)

Tiempo (s)	NOx [ppm]			HC [ppm]			CO [%]			CO ₂ [%]			PM [mg/m3]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	50	48	45	0	0	0	0.019	0.021	0.021	0.86	0.79	0.77	0.202	0.217	0.161
10	138	132	142	0	0	0	0.025	0.03	0.032	2.45	2.32	2.23	0.982	0.823	0.865
20	209	207	182	0	0	0	0.035	0.037	0.036	2.54	2.39	1.87	0.141	0.245	0.089
30	157	155	152	0	0	0	0.048	0.048	0.048	2.67	2.47	2.74	0.267	0.295	0.22
40	161	158	146	0	0	0	0.045	0.049	0.048	2.18	1.99	1.92	0.196	0.09	0.164
50	393	390	349	0	0	0	0.048	0.056	0.053	2.55	4.37	4.95	0.641	0.805	0.33
60	372	368	205	0	0	0	0.034	0.051	0.038	4.05	3.98	2.9	0.221	0.372	0.142
70	240	234	255	0	0	0	0.033	0.035	0.033	2.69	2.56	2.71	0.182	0.189	0.156
80	326	321	247	0	0	0	0.034	0.031	0.033	2.98	2.88	3.04	0.197	0.086	0.196
90	147	143	179	0	0	0	0.031	0.027	0.03	0.94	0.73	1.24	0.019	0.013	0.014
100	159	156	101	0	0	0	0.026	0.028	0.027	3.98	3.89	2.07	0.356	0.241	0.325
110	226	219	363	0	0	0	0.034	0.023	0.031	5.17	5.05	3.82	0.254	0.877	0.095
120	141	140	136	0	0	0	0.04	0.037	0.039	1.49	1.35	1.3	0.165	0.071	0.117
130	225	218	221	0	0	0	0.048	0.044	0.046	2.49	2.32	2.16	0.197	0.157	0.172
140	344	338	235	0	0	0	0.054	0.051	0.049	2.85	3.76	3.86	0.275	0.27	0.143
150	289	284	270	0	0	0	0.057	0.055	0.054	4.07	3.93	3.56	0.335	0.215	0.213
160	509	501	435	0	0	1	0.056	0.052	0.052	4.6	4.4	4.71	1.374	3.298	1.189
170	533	529	555	0	0	1	0.041	0.036	0.035	4.31	4.1	4.37	1.745	0.679	1.559
180	518	513	531	0	0	2	0.035	0.031	0.03	4.59	4.51	4.73	1.282	0.889	1.09
190	474	470	464	1	1	1	0.029	0.028	0.026	4.55	4.46	4.69	1.83	1.738	1.531
200	464	457	467	0	0	0	0.026	0.024	0.022	4.27	4.15	4.7	3.585	2.756	3.283
210	512	508	513	0	0	1	0.026	0.024	0.023	4.66	4.58	5.22	3.954	3.273	3.685
220	463	458	408	0	0	4	0.025	0.022	0.022	4.43	4.34	3.98	4.34	4.215	2.883
230	477	473	129	0	0	0	0.023	0.022	0.019	4.25	4.17	0.39	1.987	2.898	1.167

Tabla 27. Emisiones contaminantes de la mezcla B10PDR (Palmar del Río)

Tiempo (s)	NOx [ppm]			HC [ppm]			CO [%]			CO ₂ [%]			PM [mg/m3]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	77	44	45	2	2	0	0.027	0.028	0.025	0.79	0.75	0.76	0.311	0.27	0.216
10	121	97	101	2	2	2	0.037	0.036	0.038	2.6	2.63	2.78	0.476	0.75	0.716
20	249	237	208	1	2	2	0.041	0.043	0.039	2.87	2.96	2.76	0.186	0.266	0.224
30	145	129	114	2	0	1	0.052	0.055	0.053	1.5	1.87	1.85	0.133	0.148	0.133
40	238	194	183	1	0	1	0.052	0.054	0.05	2.55	2.4	2.13	0.124	0.151	0.142
50	283	286	377	3	2	2	0.058	0.057	0.06	3.15	2.92	3.72	0.562	0.321	0.312
60	299	302	219	0	1	0	0.041	0.044	0.043	3.03	2.62	2.79	0.139	0.179	0.177
70	293	286	281	3	2	2	0.04	0.042	0.039	2.69	2.8	2.87	0.221	0.119	0.114
80	308	306	305	1	1	1	0.038	0.041	0.038	2.71	2.76	2.77	0.043	0.098	0.086
90	254	204	196	1	1	0	0.037	0.036	0.033	1.94	1.72	1.55	0.036	0.091	0.088
100	78	90	104	0	0	0	0.027	0.028	0.028	1.28	1.77	2.03	0.329	0.281	0.273
110	377	356	345	0	0	0	0.035	0.034	0.032	3.84	3.94	3.89	0.615	0.322	0.316
120	210	204	171	0	0	0	0.044	0.042	0.04	2.51	1.97	1.33	0.159	0.164	0.085
130	270	254	260	2	2	2	0.049	0.045	0.044	2.68	2.47	2.47	0.142	0.112	0.108
140	184	170	215	1	0	2	0.056	0.053	0.052	2.39	2.64	2.93	0.107	0.189	0.185
150	262	249	278	1	0	1	0.055	0.054	0.056	3.22	3.32	3.74	0.167	0.202	0.255
160	332	314	324	0	0	0	0.061	0.06	0.057	4.2	4.72	3.82	0.362	0.518	0.548
170	602	648	584	0	0	1	0.045	0.042	0.041	4.57	4.46	4.55	0.903	2.091	2.052
180	522	547	552	3	2	3	0.037	0.036	0.034	4.49	4.57	4.67	1.191	1.289	1.246
190	532	521	523	1	2	1	0.03	0.03	0.028	4.75	4.74	4.69	1.89	2.269	3.207
200	507	508	511	1	2	1	0.026	0.024	0.025	4.73	4.64	4.7	3.105	2.977	2.953
210	445	474	493	2	3	2	0.024	0.025	0.023	4.36	4.31	4.44	3.551	3.094	2.872
220	508	491	509	2	2	1	0.023	0.022	0.023	4.6	4.54	4.5	4.504	3.061	2.832
230	351	235	178	3	4	3	0.024	0.021	0.02	1.14	0.93	0.64	2.639	1.87	1.568

7.3.5 Análisis estadístico de los datos de emisiones contaminantes. Partiendo de los datos obtenidos al utilizar el equipo OEM 2100 MONTANA para medir las concentraciones de las emisiones contaminantes y material particulado emitido por una fuente móvil, es necesario realizar un estudio estadístico de manera que se pueda determinar si cada una de las mediciones en el mismo tiempo durante las 3 repeticiones es similar al probar cada uno de los combustibles establecidos.

En este contexto, se debe analizar la variación de los resultados analíticos provocados por incontables variaciones durante las mediciones, falta de homogeneidad o diferencias entre muestras. Por lo cual, se aplicará pruebas de significación para detectar los errores sistemáticos que ayudan a decidir objetivamente si la diferencia entre dos medias es significativa o si ella puede ser considerada como proveniente de variaciones aleatorias.

7.3.5.1 Cálculos estadísticos para las pruebas de significación. Se aplica el siguiente cálculo modelo para encontrar el grado de significancia de los datos obtenidos por el equipo OEM 2100 MONTANA mediante la Prueba-t y la Prueba-F. Para lo cual, se considera los valores de concentración de NOx provocadas por diesel premium.

7.3.5.1.1 Prueba-t

✓ Planteamiento de hipótesis

Hipótesis nula establece que no hay diferencia significativa en las mediciones de las concentraciones medias de emisiones contaminantes entre las 2 pruebas. La hipótesis alternativa indica que sí existe diferencia significativa.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Las suposiciones establecidas son:

- Las 2 poblaciones siguen la distribución normal.
- Las 2 poblaciones tienen desviaciones estándares iguales.

- Las mediciones de las concentraciones de emisiones contaminantes en la prueba 1 son independientes de las mediciones de las concentraciones de emisiones contaminantes en la prueba 2.

✓ **Grados de libertad**

$$v = n_1 + n_2 - 2 \quad (11)$$

$$v = 24 + 24 - 2$$

$$v = 46$$

✓ **Valores críticos de t**

Tomando en cuenta que es una prueba de dos colas y de nivel de significancia 0,05.

Mediante la tabla de la Distribución t de Student, los valores de t críticos son: – 2,013 y 2,013. (Ver Anexo T).

No se rechaza la hipótesis nula si el valor calculado de t se encuentra entre – 2,013 y 2,013.

✓ **Cálculo de las desviaciones estándar de las muestras**

Tabla 28. Cálculo de la desviación estándar de las muestras

Tiempo, (s)	NOx[ppm]			
	X1	X2	(X1-Xmed 1)^2	(X2-Xmed 2)^2
1	85	92	115486.69	108268.42
10	94	105	109450.69	99882.34
20	223	227	40736.69	37652.17
30	234	210	36417.36	44538.59
40	384	381	1667.36	1603.34
50	523	519	9636.69	9595.84
60	517	515	8494.69	8828.17
70	566	546	19928.03	15614.59
80	571	556	21364.69	18213.75
90	548	531	15170.03	12090.84
100	402	419	521.36	4.17
110	415	402	96.69	362.59
120	389	399	1284.03	485.84
130	381	375	1921.36	2119.84

Tabla 28 (Continuación)

Tiempo, (s)	NOx[ppm]			
	X1	X2	(X1-Xmed 1)^2	(X2-Xmed 2)^2
140	281	272	20688.03	22213.42
150	320	338	10990.03	6895.92
160	376	362	2384.69	3485.92
170	615	628	36163.36	42831.75
180	638	637	45440.03	46638.00
190	606	593	32821.36	29569.67
200	595	589	28956.69	28210.00
210	589	580	26950.69	25267.75
220	500	497	5650.03	5769.67
230	344	332	6534.03	7928.42
Xmedi	424.83	421.04		
Σ(Xi-Xmed i)^2			598755.33	578070.96

✓ **Cálculo de la media de cada muestra**

$$X_{med1} = \frac{\sum X_1}{n_1} \quad (12)$$

$$X_{med1} = 424,83$$

$$X_{med2} = \frac{\sum X_2}{n_2} \quad (13)$$

$$X_{med2} = 421,04$$

✓ **Cálculo de la desviación estándar de cada muestra**

$$S_1 = \sqrt{\frac{\sum (X_1 - X_{med1})^2}{n_1 - 1}} \quad (14)$$

$$S_1 = \sqrt{\frac{598755.33}{24 - 1}}$$

$$S_1 = 161,35$$

$$S_2 = \sqrt{\frac{\sum (X_2 - X_{med2})^2}{n_2 - 1}} \quad (15)$$

$$S_2 = \sqrt{\frac{578070.96}{24 - 1}}$$

$$S_2 = 158,54$$

✓ **Agrupación de las varianzas de las muestras**

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{(n_1 + n_2 - 2)} \quad (16)$$

$$S_p^2 = \frac{(24 - 1) * (161,35)^2 + (24 - 1) * (158,54)^2}{(24 + 24 - 2)}$$

$$S_p^2 = 25583,18$$

✓ **Determinación del valor t**

$$t_{cal} = \frac{(X_{med1} - X_{med2})}{\sqrt{S_p^2 * \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} \quad (17)$$

$$t_{cal} = \frac{(424,83 - 421,04)}{\sqrt{25583,18 * \left(\frac{1}{24} + \frac{1}{24}\right)}}$$

$$t_{cal} = 0,08$$

Conclusión:

La decisión es no rechazar la hipótesis nula, porque 0,08 se encuentra en la región: – 2,013 y 2,013.

Nota: Repetir el mismo procedimiento para cada una de las combinaciones posibles entre las 3 pruebas realizadas.

✓ **Uso del Excel**

Excel tiene un procedimiento denominado “Prueba-t: dos muestras si las varianzas son iguales”, el mismo que nos permite generar automáticamente los valores antes calculados.

Los pasos a seguir son los siguientes:

- En una hoja de Excel colocar los datos de las mediciones en dos columnas diferentes.
- Seleccionar la pestaña “Datos”.

- Escoger la opción “Análisis de datos”.
- Seleccionar “Prueba t para dos muestras suponiendo una varianza igual”. Aceptar.
- Escoger el rango para la variable 1 y rango para la variable 2.
- Establecer un alfa = 0,05
- Aceptar.

De esta manera se genera la siguiente tabla con los resultados requeridos:

Tabla 29. Resultados de la Prueba-t suponiendo dos muestras si las varianzas son iguales

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	424.833333	421.041667
Varianza	26032.8406	25133.5199
Observaciones	24	24
Varianza agrupada	25583.1803	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	46	
Estadístico t	0.08211897	
P(T<=t) una cola	0.4674542	
Valor crítico de t (una cola)	1.67866041	
P(T<=t) dos colas	0.93490839	
Valor crítico de t (dos colas)	2.01289557	

Nota: Se realizó este procedimiento para la obtención de valores de t calculado y t crítico.

7.3.5.1.2 Prueba-F

✓ Planteamiento de hipótesis

Hipótesis nula establece que las mediciones de emisiones contaminantes medias son iguales para las 3 pruebas realizadas. La hipótesis alternativa es que no todas las mediciones de emisiones contaminantes son iguales para las 3 pruebas ejecutadas.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

H1: No todas las mediciones de emisiones contaminantes son iguales. (Considera al menos 2 mediciones nos son iguales).

✓ **Nivel de significancia**

$$\alpha = 0,05$$

✓ **Estado estadístico**

Sigue la Distribución F.

✓ **Grados de libertad**

$$\text{Grados de libertad en el numerador} = k - 1 = 3 - 1 \quad (18)$$

$$\text{Grados de libertad en el numerador} = 2$$

$$\text{Grados de libertad en el denominador} = n - k = 72 - 3 \quad (19)$$

$$\text{Grados de libertad en el denominador} = 69$$

Donde:

k = Número de pruebas

n = Número de mediciones

✓ **Valor crítico para el estadístico F**

Tomando en cuenta que es una prueba de una cola y de nivel de significancia 0,05.

Mediante la tabla de Valores críticos para la Distribución F en un nivel de significancia de 5%, el valor crítico de F es: 3,1296. (Ver Anexo U).

Se rechaza la hipótesis nula si el valor calculado de F es mayor que 3,1296.

✓ **Cálculo de la media global**

$$X_G = \frac{\text{Suma de todas las mediciones}}{\text{Número de emisiones de conc. de emisiones}} \quad (20)$$

$$X_G = \frac{30382}{72}$$

$$X_G = 421,97$$

✓ **Cálculo de la desviación de cada medición a la media total.** Ver tabla 30.

✓ **Cálculo de SS total**

$$SS\ total = \sum (X - X_G)^2 \quad (21)$$

$$SS\ total = \sum (X_1 - X_G)^2 + \sum (X_2 - X_G)^2 + \sum (X_3 - X_G)^2 \quad (22)$$

$$SS\ total = 598951.80 + 578091.74 + 584952.41$$

$$SS\ total = 1761995.94$$

✓ **Cálculo de la desviación entre cada medición y la media de cada prueba.** Ver tabla 30.

✓ **Cálculo de SSE**

$$SSE = \sum (X - X_E)^2 \quad (23)$$

$$SSE = \sum (X_1 - X_{E1})^2 + \sum (X_2 - X_{E2})^2 + \sum (X_3 - X_{E3})^2 \quad (24)$$

$$SSE = 598755.33 + 578070.96 + 584862.96$$

$$SSE = 1761689.25$$

✓ **Cálculo de SST**

$$SST = SS\ total - SSE \quad (25)$$

$$SST = 1761995.94 - 1761689.25$$

$$SST = 306.69$$

✓ Cálculos realizados para establecer SS total y SSE

Tabla 30. Cálculo de la desviación estándar de las muestras para encontrar SS total y SSE

Tiempo (s)	NOx[ppm]								
	X1	X2	X3	(X1-XG)^2	(X2-XG)^2	(X3-XG)^2	(X1-XE)^2	(X2-XE)^2	(X3-XE)^2
1	85	92	89	113550.28	108881.67	110870.50	115486.69	108268.42	109588.59
10	128	130	135	107565.78	100471.39	106257.89	109450.69	99882.34	105003.00
20	223	227	233	39589.95	38014.17	35710.50	40736.69	37652.17	34984.59
30	234	210	225	35333.56	44932.22	38798.06	36417.36	44538.59	38041.25
40	384	381	376	1441.89	1678.72	2113.45	1667.36	1603.34	1939.67
50	523	519	512	10206.61	9414.39	8105.00	9636.69	9595.84	8456.34
60	517	515	509	9030.28	8654.17	7573.83	8494.69	8828.17	7913.59
70	566	546	552	20744.00	15382.89	16907.22	19928.03	15614.59	17413.00
80	571	556	576	22209.28	17963.45	23724.56	21364.69	18213.75	24323.00
90	548	531	541	15883.00	11887.06	14167.61	15170.03	12090.84	14630.92
100	402	419	407	398.89	8.83	224.17	521.36	4.17	170.09
110	415	402	408	48.61	398.89	195.22	96.69	362.59	145.00
120	389	399	386	1087.17	527.72	1294.00	1284.03	485.84	1158.84
130	381	375	377	1678.72	2206.39	2022.50	1921.36	2119.84	1852.59
140	281	272	267	19873.17	22491.67	24016.39	20688.03	22213.42	23421.75
150	320	338	329	10398.33	7051.33	8643.83	10990.03	6895.92	8288.59

Tabla 30 (Continuación)

Tiempo (s)	NOx[ppm]								
	X1	X2	X3	(X1-XG)^2	(X2-XG)^2	(X3-XG)^2	(X1-XE)^2	(X2-XE)^2	(X3-XE)^2
160	376	362	352	2113.45	3596.67	4896.11	2384.69	3485.92	4629.67
170	615	628	603	37259.72	42447.45	32771.06	36163.36	42831.75	33473.75
180	638	637	644	46668.00	46236.95	49296.33	45440.03	46638.00	50157.34
190	606	593	596	33866.22	29250.50	30285.67	32821.36	29569.67	30961.34
200	595	589	590	29938.61	27898.28	28233.33	28956.69	28210.00	28885.84
210	589	580	588	27898.28	24972.78	27565.22	26950.69	25267.75	28210.00
220	500	497	487	6088.33	5629.17	4228.61	5650.03	5769.67	4483.42
230	344	332	338	6079.67	8095.00	7051.33	6534.03	7928.42	6730.84
ΣXi	10196	10105	10081						
XE	424.83	421.04	420.04						
Σ (Xi-XG)^2				598951.80	578091.74	584952.41			
Σ (Xi-XE)^2							598755.33	578070.96	584862.96

✓ **Representación de valores en la Tabla ANOVA**

Tabla 31. Tabla de resultados ANOVA

<i>Fuente de variación</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Media cuadrática</i>	<i>F</i>
Entre-grupos	306.69	2	153.35	0.006
Dentro-grupos	1761689.25	69	25531.73	
Total	1761995.94	71		

Conclusión:

El valor calculado de F es 0,006; el cual es menor que el valor crítico de 3,1296, por lo tanto, la hipótesis nula se acepta.

Nota: Repetir el mismo procedimiento las mediciones de cada emisión contaminante.

✓ **Uso del Excel**

Excel tiene un procedimiento para desplegar una tabla ANOVA, la misma que contiene todos los valores antes determinados.

Los pasos a seguir son los siguientes:

- En una hoja de Excel colocar los datos de las mediciones en columnas diferentes.
- Seleccionar la pestaña “Datos”.
- Escoger la opción “Análisis de datos”.
- Seleccionar “Análisis de varianza de un factor”. Aceptar.
- Escoger el rango de entrada (los valores de todas las mediciones en las 3 pruebas).
- Establecer un alfa = 0,05
- Aceptar.

De esta manera se genera la siguiente tabla con los resultados requeridos:

Tabla 32. Resultados de la Prueba-F – ANOVA. Resumen

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	24	10196	424.833333	26032.8406
Columna 2	24	10105	421.041667	25133.5199
Columna 3	24	10081	420.041667	25428.8243

Tabla 33. Resultados de la Prueba-F – ANOVA. Análisis de varianza

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	306.694444	2	153.347222	0.0060061	0.99401238	3.12964398
Dentro de los grupos	1761689.25	69	25531.7283			
Total	1761995.94	71				

Nota: Se realizó este procedimiento para la obtención de valores de F calculado y F crítico.

7.3.5.2 Resultados de las pruebas de significación. Se presentan los valores de las variables principales determinadas mediante las pruebas estadísticas de significación.

En las siguiente tablas, se detallan la desviación estándar (s), la media, los valores de t y F, tanto las calculadas como las críticas (determinadas mediante el uso del Anexo T y U, respectivamente).

Cabe mencionar que se calcula el valor t para todas las posibles comparaciones entre pruebas como: 1-2, 1-3 y 2-3. Además, se determina el valor F para comparar las varianzas obtenidas en las 3 pruebas.

Por lo tanto, si las t o F calculadas son mayores que las t o F críticas, respectivamente, se puede decir que no hay diferencia significativa entre los valores de las concentraciones de emisiones contaminantes medidas por el equipo OEM 2100 MONTANA, al probar 3 veces cada uno de los combustibles seleccionados.

Tabla 34. Resultados de las pruebas de significación para el diesel premium (DP)

	NOx, [ppm]			HC, [ppm]			CO, [ppm]			CO2, [ppm]			PM, [mg/m3]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
s	179.6036	214.3456	179.2305	3.9991	4.7302	3.7869	0.1742	0.1032	0.0137	1.2346	1.2075	1.2342	4.8221	3.3267	3.3942
Media	396.5833	335.8750	300.4583	11.5833	10.8750	9.4167	0.0965	0.0770	0.0457	4.2821	4.1979	4.1296	3.4600	2.1467	2.1259
t cal 1-2	0,082			0.5602			0.4731			0.2388			1.0983		
t crit 1-2	2.013			2.0129			2.0129			2.0129			2.0129		
t cal 1-3	0.103			1.9272			1.4254			0.4280			1.1083		
t crit 1-3	2.013			2.0129			2.0129			2.0129			2.0129		
t cal 2-3	0.022			1.1791			1.4732			0.1939			0.0214		
t crit 2-3	2.013			2.0129			2.0129			2.0129			2.0129		
F cal 1-2-3	0.006			1.6672			1.1501			0.0932			0.9175		
F crit 1-2-3	3.1296			3.1296			3.1296			3.1296			3.1296		

Tabla 35. Resultados de las pruebas de significación para el biodiesel de La Fabril (BLF)

	NOx, [ppm]			HC, [ppm]			CO, [ppm]			CO2, [ppm]			PM, [mg/m3]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
s	134.7298	134.2722	128.4425	0.8847	1.2329	0.8847	0.0091	0.0099	0.0089	1.2245	1.2737	1.2961	1.0732	0.9486	0.7269
Media	277.7083	266.6250	260.0000	0.5000	0.9583	0.5000	0.0318	0.0312	0.0291	2.9558	2.9446	2.9308	0.8826	0.6990	0.5981
t cal 1-2	0.2855			/			0.2124			0.0312			0.6282		
t crit 1-2	2.0129			/			2.0129			2.0129			2.0129		
t cal 1-3	0.4661			/			1.0461			0.0687			1.0753		
t crit 1-3	2.0129			/			2.0129			2.0129			2.0129		
t cal 2-3	0.1747			/			0.7818			0.0371			0.4133		
t crit 2-3	2.0129			/			2.0129			2.0129			2.0129		
F cal 1-2-3	0.1094			1.6342			0.5636			0.0024			0.5807		
F crit 1-2-3	3.1296			3.1296			3.1296			3.1296			3.1296		

Tabla 36. Resultados de las pruebas de significación para la mezcla B5LF (La Fabril)

	NOx, [ppm]			HC, [ppm]			CO, [ppm]			CO2, [ppm]			PM, [mg/m3]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
s	151.7914	145.5129	155.3594	3.1611	3.2098	2.0990	0.0117	0.0116	0.0115	1.3647	1.2078	1.2748	2.0730	1.8634	1.8749
Media	298.1250	294.4583	291.8750	4.4167	4.0417	3.3333	0.0419	0.0369	0.0368	3.1317	3.1204	3.1108	1.3310	1.1653	1.1636
t cal 1-2	0.0854			0.4078			1.4889			0.0302			0.2913		
t crit 1-2	2.0129			2.0129			2.0129			2.0129			2.0129		
t cal 1-3	0.1410			1.3986			1.5348			0.0547			0.2934		
t crit 1-3	2.0129			2.0129			2.0129			2.0129			2.0129		
t cal 2-3	0.0595			0.9048			0.0376			0.0267			0.0031		
t crit 2-3	2.0129			2.0129			2.0129			2.0129			2.0129		
F cal 1-2-3	0.0104			0.8822			1.5312			0.0016			0.0590		
F crit 1-2-3	3.1296			3.1296			3.1296			3.1296			3.1296		

Tabla 37. Resultados de las pruebas de significación para la mezcla B10LF (La Fabril)

	NOx, [ppm]			HC, [ppm]			CO, [ppm]			CO2, [ppm]			PM, [mg/m3]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
s	161.4098	164.2890	163.1986	2.5704	1.9886	2.0572	0.0149	0.0146	0.0143	1.2992	1.2606	1.3075	1.6725	1.6640	1.6441
Media	334.4167	322.9167	307.0417	4.5417	3.7083	3.6667	0.0473	0.0447	0.0446	3.3804	3.2483	3.1138	1.2505	1.2255	1.2144
t cal 1-2	0.2446			1.2562			0.6256			0.3574			0.0521		
crit 1-2	2.0129			2.0129			2.0129			2.0129			2.0129		
t cal 1-3	0.5843			1.3020			0.6524			0.7088			0.0755		
t crit 1-3	2.0129			2.0129			2.0129			2.0129			2.0129		
t cal 2-3	0.3358			0.0713			0.0200			0.3630			0.0232		
t crit 2-3	2.0129			2.0129			2.0129			2.0129			2.0129		
F cal 1-2-3	0.1707			1.1858			0.2753			0.2567			0.0030		
F crit 1-2-3	3.1296			3.1296			3.1296			3.1296			3.1296		

Tabla 38. Resultados de las pruebas de significación para el biodiesel de Palmar del Río (BPDR)

	NOx, [ppm]			HC, [ppm]			CO, [ppm]			CO2, [ppm]			PM, [mg/m3]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
s	134.7106	125.1946	129.9402	0.0000	0.0000	0.6079	0.0113	0.0110	0.0099	1.3086	1.4344	1.3986	0.6016	0.4470	0.4686
Media	254.2083	249.0417	250.8750	0.0000	0.0000	0.2500	0.0390	0.0354	0.0333	3.0450	3.0067	2.9563	0.8542	0.8244	0.7915
t cal 1-2	0.1376			/			1.1420			0.0967			0.1947		
t crit 1-2	2.0129			/			2.0129			2.0129			2.0129		
t cal 1-3	0.1927			/			1.8663			0.2270			0.4023		
t crit 1-3	2.0129			/			2.0129			2.0129			2.0129		
t cal 2-3	0.0621			/			0.6764			0.1233			0.2484		
t crit 2-3	2.0129			/			2.0129			2.0129			2.0129		
F cal 1-2-3	0.0097			/			1.7445			0.0249			0.0904		
F crit 1-2-3	3.1296			3.1296			3.1296			3.1296			3.1296		

Tabla 39. Resultados de las pruebas de significación para la mezcla B5PDR (Palmar del Río)

	NOx, [ppm]			HC, [ppm]			CO, [ppm]			CO2, [ppm]			PM, [mg/m3]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
s	152.8975	152.2237	151.9056	0.2041	0.2041	0.3807	0.0111	0.0118	0.0111	1.2452	1.2695	1.4347	1.2825	1.2660	1.0706
Media	313.6250	309.1667	280.4167	0.0417	0.0417	0.1667	0.0363	0.0359	0.0353	3.3175	3.3121	3.0804	1.0303	1.0297	0.8245
t cal 1-2	0.1012			/			0.1261			0.0149			0.0017		
t crit 1-2	2.0129			/			2.0129			2.0129			2.0129		
t cal 1-3	0.7548			/			0.3262			0.6114			0.6033		
t crit 1-3	2.0129			/			2.0129			2.0129			2.0129		
t cal 2-3	0.6549			/			0.1891			0.5924			0.6061		
t crit 2-3	2.0129			/			2.0129			2.0129			2.0129		
F cal 1-2-3	0.3360			1.6429			0.0515			0.2526			0.2305		
F crit 1-2-3	3.1296			3.1296			3.1296			3.1296			3.1296		

Tabla 40. Resultados de las pruebas de significación para la mezcla B10PDR (Palmar del Río)

	NOx, [ppm]			HC, [ppm]			CO, [ppm]			CO2, [ppm]			PM, [mg/m3]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
s	146.9109	159.3714	159.5670	1.0495	1.1516	0.9631	0.0117	0.0117	0.0118	1.2033	1.2217	1.2647	1.2651	1.0609	1.0840
Media	310.2917	297.7500	294.8333	1.3333	1.2500	1.1667	0.0400	0.0397	0.0384	3.0246	3.0188	3.0158	0.9123	0.8680	0.8628
t cal 1-2	0.2835			0.2620			0.0862			0.0167			0.1314		
t crit 1-2	2.0129			2.0129			2.0129			2.0129			2.0129		
t cal 1-3	0.3492			0.5732			0.4670			0.0246			0.1454		
t crit 1-3	2.0129			2.0129			2.0129			2.0129			2.0129		
t cal 2-3	0.0634			0.2719			0.3803			0.0081			0.0167		
t crit 2-3	2.0129			2.0129			2.0129			2.0129			2.0129		
F cal 1-2-3	0.0670			0.1490			0.1235			0.0003			0.0136		
F crit 1-2-3	3.1296			3.1296			3.1296			3.1296			3.1296		

7.3.6 Análisis de la reducción de emisiones contaminantes de la mezcla B5LF (5%volumen de biodiesel de La Fabril) con respecto al diesel premium. Partiendo del conocimiento de la existencia del Decreto Ejecutivo N°1303, firmado el 17 de Septiembre de 2012, en el que a partir de marzo del 2014, en Ecuador, se comenzará a comercializar un nuevo combustible para fuentes móviles con motor a diesel, el que corresponde a la mezcla B5 (5% volumen de biodiesel de La Fabril + 95% volumen de diesel premium); se analizará la reducción de emisiones contaminantes de esta mezcla, tomando como referencia las emisiones producidas por la utilización del diesel premium en una fuente móvil.

Además, conociendo los resultados del análisis estadístico de significación y habiendo obtenido que las concentraciones de emisiones contaminantes no tienen diferencia significativa, podemos realizar lo siguiente:

Con los datos obtenidos con el equipo OEM 2100 MONTANA, representados en las Tablas 21 y 23, se determinó un promedio de las concentraciones de emisiones contaminantes medidas en las 3 pruebas en cada tiempo establecido.

De acuerdo a lo antes mencionado, se determinó la variación de emisiones contaminantes en porcentaje, al comparar las emisiones provocadas por la fuente móvil al consumir la mezcla B5LF con respecto a las emisiones provocadas por el consumo de diesel premium.

7.3.6.1 Cálculo para determinar la disminución de emisiones contaminantes utilizando la mezcla B5LF con respecto al diesel premium

- ✓ **Cálculo del promedio de concentraciones de emisiones de NO_x del diesel premium para el tiempo de 1 segundo**

$$X = \frac{\sum X_i}{n_i}$$

Donde:

Xi: Concentraciones de las emisiones de NO_x del diesel premium correspondientes a las 3 pruebas ejecutadas en el tiempo de 1 segundo. (Ver Tabla 21)

n_i : Número de pruebas.

$$X = \frac{(85 + 92 + 89)}{3} [ppm]$$

$$X = 88,67 [ppm]$$

- ✓ **Cálculo del promedio de concentraciones de emisiones de NOx de la mezcla B5LF para el tiempo de 1 segundo**

$$Y = \frac{\sum Y_i}{n_i}$$

Donde:

Yi: Concentraciones de las emisiones de NOx de la mezcla B5LF correspondientes a las 3 pruebas ejecutadas en el tiempo de 1 segundo. (Ver Tabla 23)

n_i : Número de pruebas.

$$Y = \frac{(70 + 47 + 51)}{3} [ppm]$$

$$Y = 56 [ppm]$$

- ✓ **Cálculo de la reducción de emisiones de NOx de la mezcla B5LF con relación al diesel premium**

$$Reducción\ emisiones = \frac{(X - Y)}{X} * 100$$

$$Reducción\ emisiones = \frac{(88,67 - 56)}{88,67} * 100$$

$$Reducción\ emisiones = 36,84 [\%]$$

- ✓ **Cálculo del total de la reducción de emisiones de NOx de la mezcla B5LF con relación al diesel premium**

$$TOTAL\ Reducción\ emisiones = \frac{\sum Reducción\ de\ emisiones}{m_i}$$

Donde:

m_i : Número de mediciones de concentraciones de emisiones de NOx.

$$TOTAL\ reducción\ emisiones = \frac{728,15}{24}$$

$$TOTAL\ reducción\ emisiones = 30,34\ [\%]$$

Nota:

- Realizar el mismo procedimiento para cada una de las mediciones de concentraciones de NO_x en cada intervalo de tiempo.
- Realizar el mismo procedimiento para cada una de las mediciones de concentraciones de hidrocarburos no combustionados (HC), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂) y material particulado (PM); en cada intervalo de tiempo.
- Determinar % total de reducción de emisiones.

✓ **Resultados de la reducción de emisiones contaminantes de la mezcla B5LF (5%volumen de biodiesel de La Fabril) con respecto al diesel premium**

Tabla 41. Reducción de emisiones contaminantes de la mezcla B5LF con respecto al diesel premium

Tiempo, (s)	NOx[ppm]			HC[ppm]			CO[%]			CO2[%]			PM[mg/m3]		
	X DP	Y B5LF	Reducción emisiones (%)	X DP	Y B5LF	Reducción emisiones (%)	X DP	Y B5LF	Reducción emisiones (%)	X DP	Y B5LF	Reducción emisiones (%)	X DP	Y B5LF	Reducción emisiones (%)
1	88.67	56.00	36.84	16.67	1.00	94.00	0.050	0.026	47.68	1.87	0.83	55.69	0.21	0.12	45.06
10	131.00	122.00	6.87	18.00	1.00	94.44	0.063	0.033	47.09	3.66	2.90	20.75	1.18	0.47	60.52
20	227.67	204.00	10.40	18.33	1.00	94.55	0.061	0.039	36.41	5.34	2.60	51.40	0.91	0.11	88.01
30	223.00	141.33	36.62	14.00	1.33	90.48	0.350	0.052	85.16	3.78	2.61	30.89	0.11	0.09	20.43
40	380.33	194.33	48.90	12.00	2.67	77.78	0.073	0.049	33.18	3.73	2.01	46.07	0.13	0.10	18.73
50	518.00	265.00	48.84	12.00	3.33	72.22	0.081	0.050	38.27	4.64	2.56	44.79	1.26	0.22	82.30
60	513.67	279.00	45.68	8.67	1.67	80.77	0.058	0.037	36.21	5.54	3.16	42.93	0.40	0.09	77.63
70	554.67	301.33	45.67	9.00	2.33	74.07	0.054	0.034	37.27	5.27	3.03	42.50	0.19	0.12	33.75
80	567.67	324.00	42.92	11.67	1.00	91.43	0.052	0.034	35.03	5.23	3.02	42.28	0.22	0.19	14.42
90	540.00	228.67	57.65	11.67	1.33	88.57	0.045	0.031	31.11	3.14	1.27	59.55	0.11	0.11	0.00
100	409.33	105.00	74.35	9.00	0.33	96.30	0.044	0.025	42.86	3.98	3.51	11.74	0.17	0.16	4.00
110	408.33	308.00	24.57	6.67	2.33	65.00	0.073	0.036	51.14	4.23	3.78	10.79	2.07	0.35	83.20
120	391.33	173.67	55.62	6.67	5.00	25.00	0.070	0.045	35.71	2.71	1.76	35.14	0.25	0.04	85.73
130	377.67	257.67	31.77	9.67	5.00	48.28	0.076	0.052	31.72	4.35	2.46	43.52	0.18	0.12	33.21
140	273.33	216.67	20.73	9.67	3.67	62.07	0.082	0.057	30.08	4.47	2.70	39.63	0.25	0.24	4.76
150	329.00	231.67	29.58	12.00	4.67	61.11	0.069	0.058	16.35	4.64	3.21	30.84	1.97	0.47	76.23
160	363.33	335.00	7.80	11.67	6.00	48.57	0.063	0.057	10.00	5.62	4.25	24.38	0.68	0.65	3.21
170	615.33	548.00	10.94	11.33	6.33	44.12	0.215	0.044	79.53	5.41	5.31	1.97	3.65	1.42	61.21

Tabla 41 (Continuación)

Tiempo, (s)	NOx[ppm]			HC[ppm]			CO[%]			CO2[%]			PM[mg/m3]		
	DP	B5LF	Reducción emisiones (%)	DP	B5LF	Reducción emisiones (%)	DP	B5LF	Reducción emisiones (%)	DP	B5LF	Reducción emisiones (%)	DP	B5LF	Reducción emisiones (%)
180	639.67	534.67	16.41	8.00	7.00	12.50	0.041	0.036	13.01	4.90	4.66	4.90	2.33	0.93	60.32
190	598.33	523.00	12.59	12.33	8.00	35.14	0.035	0.031	11.54	5.01	4.76	4.93	4.69	2.43	48.13
200	591.33	512.00	13.42	12.00	6.67	44.44	0.027	0.026	4.88	5.09	4.79	6.02	7.29	4.19	42.52
210	585.67	539.67	7.85	11.00	7.67	30.30	0.025	0.025	0.00	4.71	4.62	2.05	10.06	5.42	46.15
220	494.67	446.00	9.84	9.00	7.67	14.81	0.023	0.023	0.00	4.67	4.19	10.28	12.92	6.40	50.46
230	338.00	229.00	32.25	9.33	7.33	21.43	0.023	0.023	0.00	1.35	0.93	30.69	10.74	4.82	55.14
TOTAL Reducción emisiones (%)	30.34			61.14			31.43			28.91			45.63		

8. CÁLCULOS

Para reportar los valores obtenidos mediante experimentación en el laboratorio, es necesario realizar algunos cálculos establecidos en los diferentes métodos de ensayo según las Normas ASTM, los mismos que se detallan a continuación:

8.1 Cálculo modelo para la caracterización del Biodiesel de La Fabril

8.1.1 Cálculo de la densidad a 15,6 °C (60°F) según la norma ASTM D 287

✓ Definición de variables

Tabla 42. Definición de variables para determinar la densidad a 15,6°C (60°F)

Variable	Unidad	Definición
T ob	°C, °F	Temperatura observada durante el ensayo
x = °API ob	/	Densidad o Gravedad API a la temperatura observada (15°C)
y = °API 60°F	/	Densidad o Gravedad API corregida a 60°F
sp _{60/60°F}	/	Densidad relativa
ρ _{H₂O 60°F}	kg/m ³	Densidad del agua a 60°F
ρ _{BLF 60°F}	kg/m ³	Densidad del biodiesel de La Fabril a 60°F
x ₂	/	Valor superior de los rangos de la densidad API observada
x ₁	/	Valor inferior de los rangos de la densidad API observada
y ₂	/	Valor superior de densidad API corregida a 60°F correspondiente la temperatura observada
y ₁	/	Valor inferior de densidad API corregida a 60°F correspondiente la temperatura observada

✓ **Datos experimentales**

Tabla 43. Datos experimentales para determinar la densidad a 15,6°C (60°F)

Dato experimental	Valor
T _{ob} , (°C)	15.0
x = °API _{ob}	29.9

✓ **Datos consultados**

Tabla 44. Datos consultados para determinar la densidad a 15,6°C (60°F)

Dato consultado	Valor	Fuente
ρ _{H₂O 60°F} , (kg/m ³)	999.0343	PERRY, John. Manual del Ingeniero Químico. Densidad de sustancias puras. Tabla 3-45. p. 3-70.
x ₂	30.0	AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Petroleum measurement tables. Table 5B. Generalized products. Correction of Observed API Gravity to API Gravity at 60°F. Volume II. Washington, 2007. p. 95.
x ₁	29.5	
y ₂	30.1	
y ₁	29.6	

✓ Transformación de la temperatura de °C a °F

$$T_{ob}(^{\circ}F) = \frac{9}{5} * T_{ob}(^{\circ}C) + 32 \quad (26)$$

$$T_{ob}(^{\circ}F) = \frac{9}{5} * 15[^{\circ}C] + 32$$

$$T_{ob}(^{\circ}F) = 59[^{\circ}F]$$

✓ Determinación de la densidad API corregida a 60°F

Tabla 45. Tabla de valores para la interpolación para determinar la densidad a 15,6°C. (60°F) (Ver Anexo V)

x ₂	30.0
x ₁	29.5

Tabla 45 (Continuación)

y_2	30.1
y_1	29.6
$x = ^\circ\text{API ob}$	29.9
$y = ^\circ\text{API } 60^\circ\text{F}$?

✓ Interpolación

$$y = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}(x - y_1) + y_1 \quad (27)$$

$$y = \frac{(30,1 - 29,6)}{(30,0 - 29,5)}(29,9 - 29,5) + 29,6$$

$$y = 30,0$$

$$^\circ\text{API } 60^\circ\text{F} = 30$$

✓ Cálculo de la densidad relativa o específica

$$^\circ\text{API } 60^\circ\text{F} = \frac{141,5}{sp_{60/60^\circ\text{F}}} - 131,5 \quad (28)$$

$$sp_{60/60^\circ\text{F}} = \frac{141,5}{^\circ\text{API } 60^\circ\text{F} + 131,5} \quad (29)$$

$$sp_{60/60^\circ\text{F}} = \frac{141,5}{30 + 131,5}$$

$$sp_{60/60^\circ\text{F}} = 0,8761$$

✓ Cálculo de la densidad a 15°C

$$sp_{60/60^\circ\text{F}} = \frac{\rho_{BLF \ 60^\circ\text{F}}}{\rho_{H2O \ 60^\circ\text{F}}} \quad (30)$$

$$\rho_{BLF \ 60^\circ\text{F}} = sp_{60/60^\circ\text{F}} * \rho_{H2O \ 60^\circ\text{F}} \quad (31)$$

$$\rho_{BLF \ 60^\circ\text{F}} = 0,8761 * 999,0343 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\rho_{BLF \ 60^\circ\text{F}} = 875,31 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

8.1.2 Cálculo del punto de inflamación según la Norma ASTM D 93

✓ Definición de variables

Tabla 46. Definición de variables para determinar el punto de inflamación

Variable	Unidad	Definición
C	°C	Punto de inflamación observado
P	mmHg	Presión barométrica del ambiente
K	Kpa	Presión barométrica del ambiente
PI _c	°C	Punto de inflamación corregido del biodiesel de La Fabril

✓ Datos experimentales

Tabla 47. Datos experimentales para determinar el punto de inflamación

Dato experimental	Valor
C, (°C)	112.0
P, (mmHg)	545.3

✓ Transformación de la presión barométrica de mmHg a KPa

$$K = P [\text{mmHg}] * \frac{1 [\text{KPa}]}{7,50 [\text{mmHg}]}$$

$$K = 545,3 [\text{mmHg}] * \frac{1 [\text{KPa}]}{7,5 [\text{mmHg}]}$$

$$K = 72,7 [\text{KPa}]$$

✓ Cálculo del punto de inflamación corregido

$$PI_c = C + 0,25 * (101,3 - K) \quad (32)$$

$$PI_c = 112[°C] + 0,25 \left[\frac{°C}{KPa} \right] * (101,3[KPa] - 72,7[KPa])$$

$$PI_c = 119,2[°C]$$

8.1.3 Cálculo del contenido de agua según la Norma ASTM D 95

✓ Definición de variables

Tabla 48. Definición de variables para determinar el contenido de agua

Variable	Unidad	Definición
V _x	ml	Volumen de agua en el solvente xileno
V _a	ml	Volumen del agua en la trampa
W _m	g	Peso de la muestra
% V/m	%	Porcentaje volumen/masa de contenido de agua en la muestra
A _{v/m}	ml/g	Relación volumen/masa de contenido de agua en la muestra
A _{m/m}	mg/kg	Relación masa/masa de contenido de agua en la muestra

✓ Datos experimentales

Tabla 49. Datos experimentales para determinar el contenido de agua

Dato experimental	Valor
V _a , (ml)	0.03333
W _m , (g)	100.018

✓ Datos consultados

Tabla 50. Datos consultados para determinar el contenido de agua

Dato consultado	Valor	Fuente
V _x , (ml)	0.00025	Información del reactivo líquido en el recipiente.
ρ _{H₂O} , (20°C), (g/ml)	0.998	PERRY, John. Manual del Ingeniero Químico. Densidad de sustancias puras. Tabla 3-45. Pp. 3-70.

✓ Cálculo de la relación volumen-masa del contenido de agua en la muestra

$$A_{v/m} = \frac{V_a - V_x}{W_m} \quad (33)$$

$$A_{v/m} = \frac{0,03333 - 0,00025}{100,018}$$

$$A_{v/m} = 0,00033$$

- ✓ Cálculo de la relación masa-masa del contenido de agua en la muestra

$$A_{m/m} = A_{v/m} \left[\frac{ml \ H_2O}{g \ BLF} \right] * \rho_{H_2O} \left[\frac{g}{ml} \right] * \frac{1000 \ [g \ BLF]}{1 \ [kg \ BLF]} * \frac{1000 \ [mg \ H_2O]}{1 \ [g \ H_2O]} \quad (34)$$

$$A_{m/m} = 0,00033 \left[\frac{ml \ H_2O}{g \ BLF} \right] * 0,998 \left[\frac{g}{ml} \right] * \frac{1000 \ [g \ BLF]}{1 \ [kg \ BLF]} * \frac{1000 \ [mg \ H_2O]}{1 \ [g \ H_2O]}$$

$$A_{m/m} = 330,11 \left[\frac{mg \ H_2O}{kg \ BLF} \right]$$

8.1.4 Cálculo de la viscosidad cinemática según la Norma ASTM D 445

- ✓ Identificación del viscosímetro

Viscosímetro Cannon-Fenske Routine N°75 – 75S252

- ✓ Definición de variables

Tabla 51. Definición de variables para determinar la viscosidad cinemática

Variable	Unidad	Definición
T	°C	Temperatura a la que se realiza el ensayo
t _{1,2}	s	Tiempo que tarda en recorrer el fluido dentro viscosímetro entre las señales marcadas 1,2
C ₁	Cst/s	Constante de calibración del viscosímetro N° 75 a 40°C
g lb. estandarización	m/s ²	Gravedad en el laboratorio de estandarización
g lb. ensayo	m/s ²	Gravedad en el laboratorio donde se realiza el ensayo
k	/	Factor de corrección de gravedad
C ₂	Cst/s	Constante de calibración del viscosímetro N° 75 corregida a 40°C
v _{1,2}	Cst/s = mm ² /s	Viscosidad cinemática del biodiesel de La Fabril a 40°C

✓ **Datos experimentales**

Tabla 52. Datos experimentales para determinar la viscosidad cinemática

Dato experimental	Valor
T, (°C)	40
t _{1,2} , (s)	245.68

minutos	4	segundos	5	fracción de seg	68
---------	---	----------	---	-----------------	----

✓ **Datos consultados**

Tabla 53. Datos consultados para determinar la viscosidad cinemática

Dato consultado	Valor	Fuente
C ₁ , (Cst/s)	0.007444	Viscosímetro Cannon-Fenske Routine N°75 – 75S252
g _{lab. estandarización} , (m/s ²)	981.0	
g _{lab. ensayo} , (m/s ²)	980.1	

✓ **Cálculo del factor de corrección de la gravedad**

$$k = \frac{g_{lab. estandarización}}{g_{lab. ensayo}} \quad (35)$$

$$k = \frac{981,0 \left[\frac{m}{s^2} \right]}{980,1 \left[\frac{m}{s^2} \right]}$$

$$k = 1,0009183$$

✓ **Cálculo de la constante de calibración corregida del viscosímetro**

$$C_2 = C_1 * k \quad (36)$$

$$C_2 = 0,007444 \left[\frac{cSt}{s} \right] * 1,000918274$$

$$C_2 = 0,007451 \left[\frac{cSt}{s} \right]$$

- ✓ Cálculo de la viscosidad cinemática a 40°C

$$v_{1,2} = C_2 * t_{1,2} \quad (37)$$

$$v_{1,2} = 0,007451 \left[\frac{cSt}{s} \right] * 245,68[s]$$

$$v_{1,2} = 1,83 [cSt]$$

Nota: Valor permitido según la norma: 1,6 - 8

8.1.5 Cálculo del Número de Cetano según la Norma ASTM D 976

- ✓ Definición de variables

Tabla 54. Definición de variables para determinar el Número de Cetano

Variable	Unidad	Definición
P	mmHg	Presión barométrica, en el tiempo y lugar del ensayo
Tc	°C	Temperatura de ebullición media observada en Grados Centígrados
Tf	°F	Temperatura de ebullición media observada en Grados Fahrenheit
Cc	°C	Factor de corrección que será añadida a la temperatura de ebullición media observada
Tcc	°C	Temperatura de ebullición media corregida en Grados Centígrados
IC	/	Índice de Cetano
IC nomograma	/	Índice de Cetano determinado mediante el uso del nomograma
°API ob = G	/	Gravedad API determinada con el método ASTM D 287
M	°F	Temperatura de ebullición media determinada por el método ASTM D 86 y corregida a la presión barométrica estándar
NC	/	Número de Cetano
NC nomograma	/	Número de Cetano determinado mediante el uso del nomograma

- ✓ Datos experimentales

Tabla 55. Datos experimentales para determinar el Número de Cetano

Dato experimental	Valor
P, (mmHg)	545.3
Tc, (°C)	295.0

✓ **Datos consultados**

Tabla 56. Datos consultados para determinar el Número de Cetano

Dato consultado	Valor	Fuente
°API 60°F = G	30	Dato corregido, según la Norma ASTM D287

✓ Cálculo de la temperatura de ebullición media corregida

$$C_c = 0,00012 * (760 - P) * (273 + t_c) \quad (38)$$

$$C_c = 0,00012 \left[\frac{1}{mmHg} \right] * (760 - 545,3)[mmHg] * (273 + 295)[^{\circ}C]$$

$$C_c = 14,63[^{\circ}C]$$

✓ Temperatura corregida

$$T_{cc} = T_c + C_c \quad (39)$$

$$T_{cc} = 295[^{\circ}C] + 14,63[^{\circ}C]$$

$$T_{cc} = 309,63[^{\circ}C]$$

✓ Transformación de la temperatura de °C a °F

$$M = \frac{9}{5}(T_{cc}) + 32 \quad (40)$$

$$M = \frac{9}{5}(309,63) + 32$$

$$M = 589,34[^{\circ}F]$$

✓ Cálculo del Índice de Cetano

$$IC = -420,34 + 0,016 * G^2 + 0,192 * G * \log M + 65,01 * (\log M)^2 - 0,0001809M^2 \quad (41)$$

$$IC = -420,34 + 0,016 * (30)^2 + 0,192 * 30 * \log(589,34) + 65,01 * (\log(589,34))^2 - 0,0001809(589,34)^2$$

$$IC = 45,98$$

- ✓ Determinación del Índice de Cetano mediante la utilización del nomograma.
(Ver Anexo W)

$$IC = 46$$

- ✓ Cálculo del Número de Cetano

$$NC = 5,28 + 0,371 * IC + 0,0112 * IC * IC \quad (42)$$

$$NC = 5,28 + 0,371 * 45,9849 + 0,0112 * 45,9849 * 45,9849$$

$$NC = 46,02$$

- ✓ Determinación del Índice de Cetano con el dato obtenido mediante la utilización del nomograma

$$NC = 5,28 + 0,371 * IC + 0,0112 * IC * IC \quad (43)$$

$$NC = 5,28 + 0,371 * 46 + 0,0112 * 46 * 46$$

$$NC = 46,05$$

8.1.6 Cálculo de la temperatura de ebullición al 90% de destilado según la Norma ASTM D86

- ✓ Definición de variables

Tabla 57. Definición de variables para determinar la Temperatura de ebullición al 90% de destilado

Variable	Unidad	Definición
P	mmHg	Presión barométrica, en el tiempo y lugar del ensayo
Tc	°C	Temperatura de ebullición al 90% de destilado observada
Cc	°C	Factor de corrección que será añadida a la temperatura de ebullición media observada
Tcc	°C	Temperatura de ebullición al 90% de destilado corregida

✓ **Datos experimentales**

Tabla 58. Datos experimentales para determinar la Temperatura de ebullición al 90% de destilado

Dato experimental	Valor
P, (mmHg)	545.3
T _c , (°C)	295.0

✓ Cálculo de la temperatura de ebullición al 90% de destilado

$$C_c = 0,00012 * (760 - P) * (273 + t_c) \quad (44)$$

$$C_c = 0,00012 \left[\frac{1}{mmHg} \right] * (760 - 545,3)[mmHg] * (273 + 320)[^{\circ}C]$$

$$C_c = 15,28[^{\circ}C]$$

✓ Temperatura corregida

$$T_{cc} = T_c + C_c \quad (45)$$

$$T_{cc} = 320[^{\circ}C] + 15,28[^{\circ}C]$$

$$T_{cc} = 335,28[^{\circ}C]$$

8.2 Resultados totales de los cálculos realizados.

Ver Anexo X.

9. ANALISIS DE RESULTADOS

9.1 Significado de los ensayos aplicados

Tabla 59. Significado del ensayo aplicado

N°	Ensayo	Análisis
1	Densidad	Nos muestra el contenido de energía en el combustible. Mayores densidades generan mayor energía térmica, buen rendimiento y economía del combustible.
2	Punto de inflamación	Se determinan los productos volátiles para conocer la temperatura máxima a la que el fluido puede ser calentado sin ningún peligro. También es útil para conocer si existe una cantidad excesiva de alcohol no reaccionado en el proceso de obtención del biodiesel.
3	φ Agua y sedimento	El agua puede provocar ciertos daños en el motor como: corrosión en componentes del motor, contribuye al crecimiento de microorganismos formando lodos y saturando los filtros. Los sedimentos se deben a un mal proceso de purificación del combustible o contaminación. Estos problemas afectan principalmente a la Temperatura de Cristalización y al Número de Cetano.
4	Viscosidad cinemática	Se debe poseer una viscosidad mínima para evitar pérdidas de potencia debido a las fugas en la bomba de inyección y el inyector. Una viscosidad adecuada generará un bombeado correcto en el motor y dará las características necesarias de lubricidad.
5	Contenido de azufre	Contribuye al desgaste del motor y a la aparición de depósitos que varían considerablemente dependiendo del funcionamiento del motor. También afecta al sistema de control de emisiones y límites medioambientales
6	Corrosión lámina de cobre	Mediante la comprobación de una lámina de cobre se puede observar si existen en el sistema compuestos corrosivos o presencia de ácidos que pueden atacar al cobre o sus aleaciones.

Tabla 59 (Continuación)

Nº	Ensayo	Análisis
7	Número de cetano	Es una medida de la calidad de ignición del combustible e influye en las emisiones de humo y en la calidad de la combustión. El número de cetano depende del diseño y tamaño del motor, de las variaciones de carga y velocidad y de las condiciones de arranque y atmosféricas. El bajo número de cetano provoca ruidos en el motor, prolonga el retraso de la ignición y aumenta el peso molecular de las igniciones.
8	Temperatura de destilación	Indica la temperatura máxima a la que se debe evaporar el combustible a condiciones de temperatura y presión dadas. La curva de destilación predice la composición del producto.
9	W _{Glicerina libre}	Determina el nivel de glicerina no enlazada presente en el biodiesel debido a su mala purificación. Los niveles altos pueden causar depósitos en el inyector, así como también obstrucción de filtros. Esto afectará al contenido de residuo carbonoso.
10	W _{Glicerina total}	Determina la cantidad de glicerina enlazada y no enlazada presente en el combustible. Niveles bajos significa que se ha producido un nivel alto de conversión en el aceite o grasa y se han formado gran cantidad de monoésteres. Los niveles altos de mono, di y triglicéridos pueden formar depósitos carbonosos en los inyectores y pueden afectar a las propiedades a bajas temperaturas.
11	Contenido de metales alcalinos	Contribuyen en el aumento de residuo carbonoso y también a las cenizas.
12	Poder calórico calculado	Representa la energía liberada por unidad de masa del combustible.

Nota: Ver los diagramas del Anexo Y. Representación comparativa de las diferentes propiedades con respecto a las distintas muestras analizadas.

9.2 Análisis del estudio cromatográfico de las muestras

9.2.1 Comparación cromatográfica del Aceite rojo de palma – Biodiesel La Fabril (BLF) – Biodiesel Palmar del Río (BPDR)

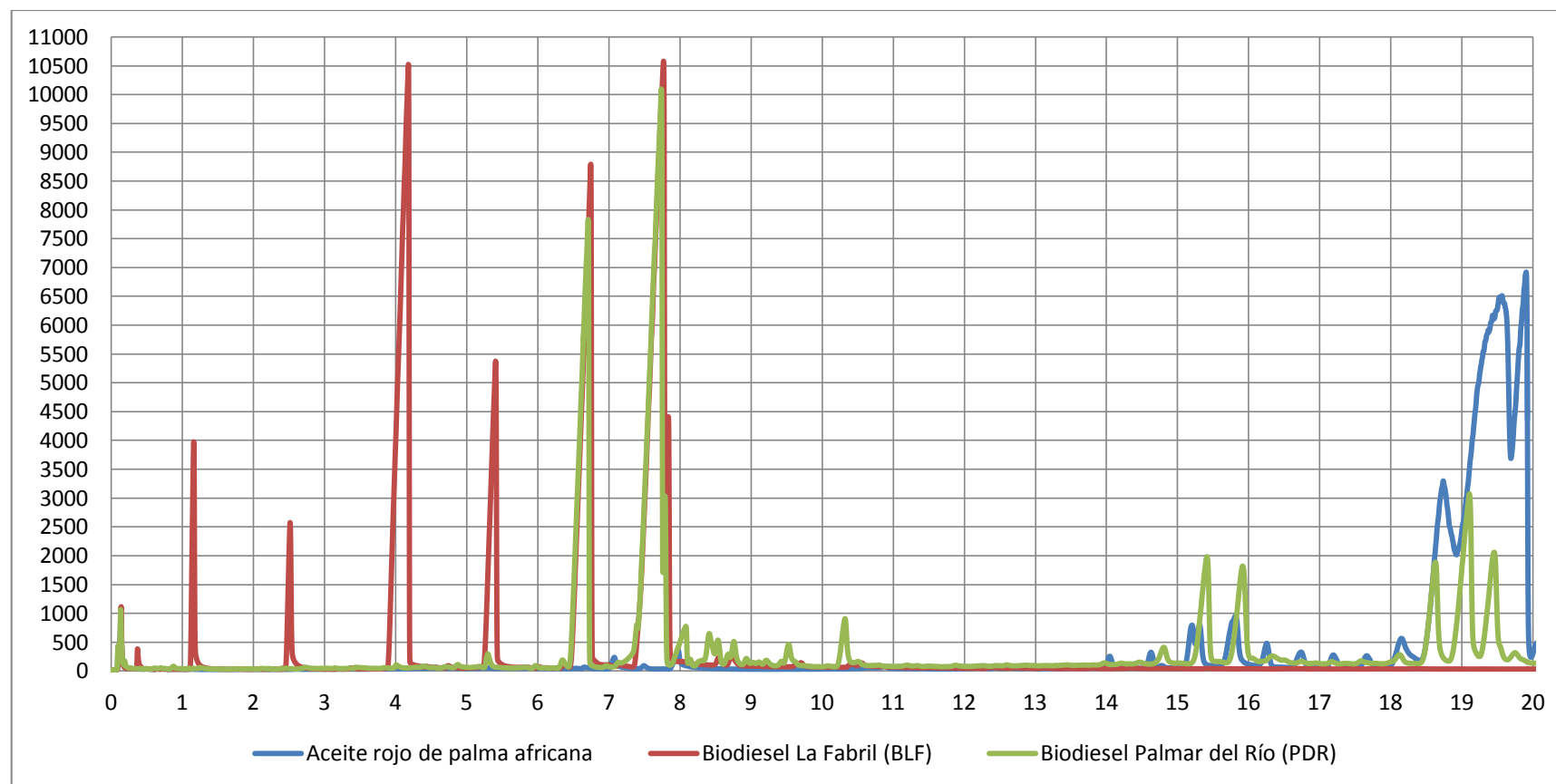


Gráfico 9. Comparación cromatográfica del Aceite rojo de palma – BLF – BPDR. Señal= f (Tiempo de retención)

9.2.2 Comparación cromatográfica del Diesel Premium (DP) – Biodiesel La Fabril (BLF) – Biodiesel Palmar del Río (BPDR)

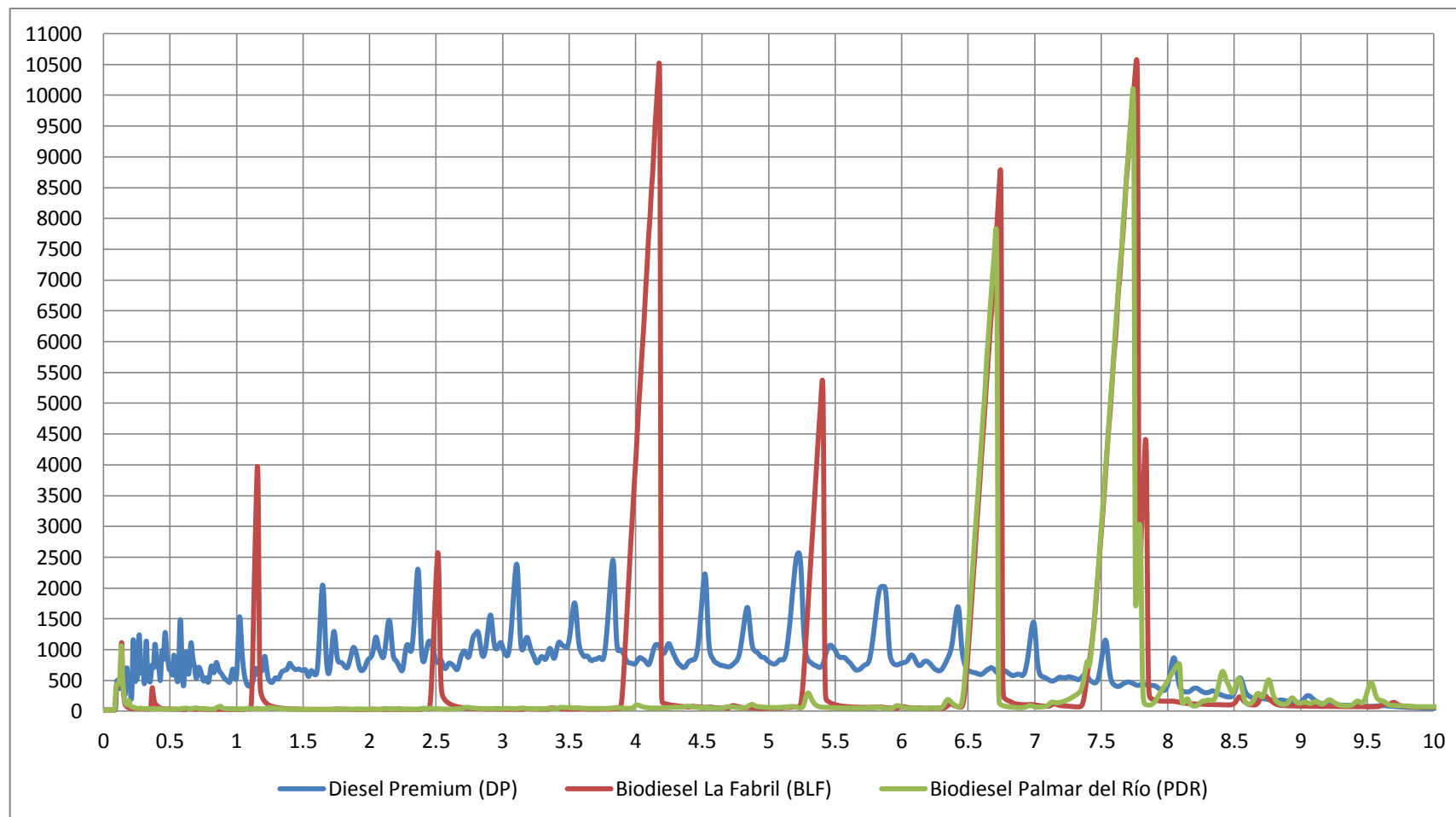


Gráfico 10. Comparación cromatográfica del DP – BLF – BPDR. Señal=f(Tiempo de retención)

9.2.3 Comparación cromatográfica del Diesel Premium (DP) – Biodiesel La Fabril (BLF) – Mezcla B5LF

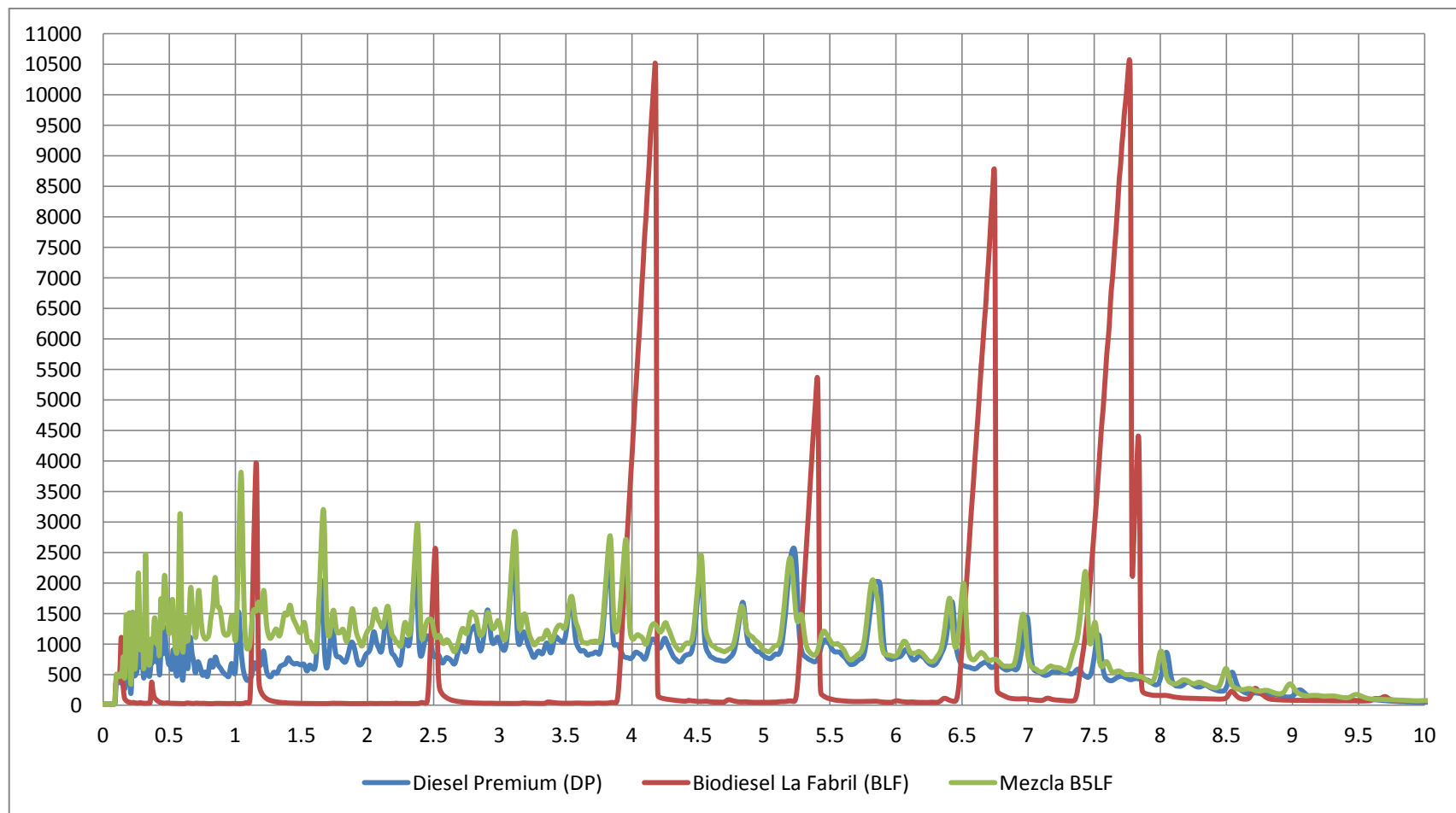


Gráfico 11. Comparación cromatográfica del DP – BLF – B5LF. Señal= f (Tiempo de retención)

9.2.4 Comparación cromatográfica del Diesel Premium (DP) – Biodiesel Palmar del Río (BPDR) – Mezcla B5PDR

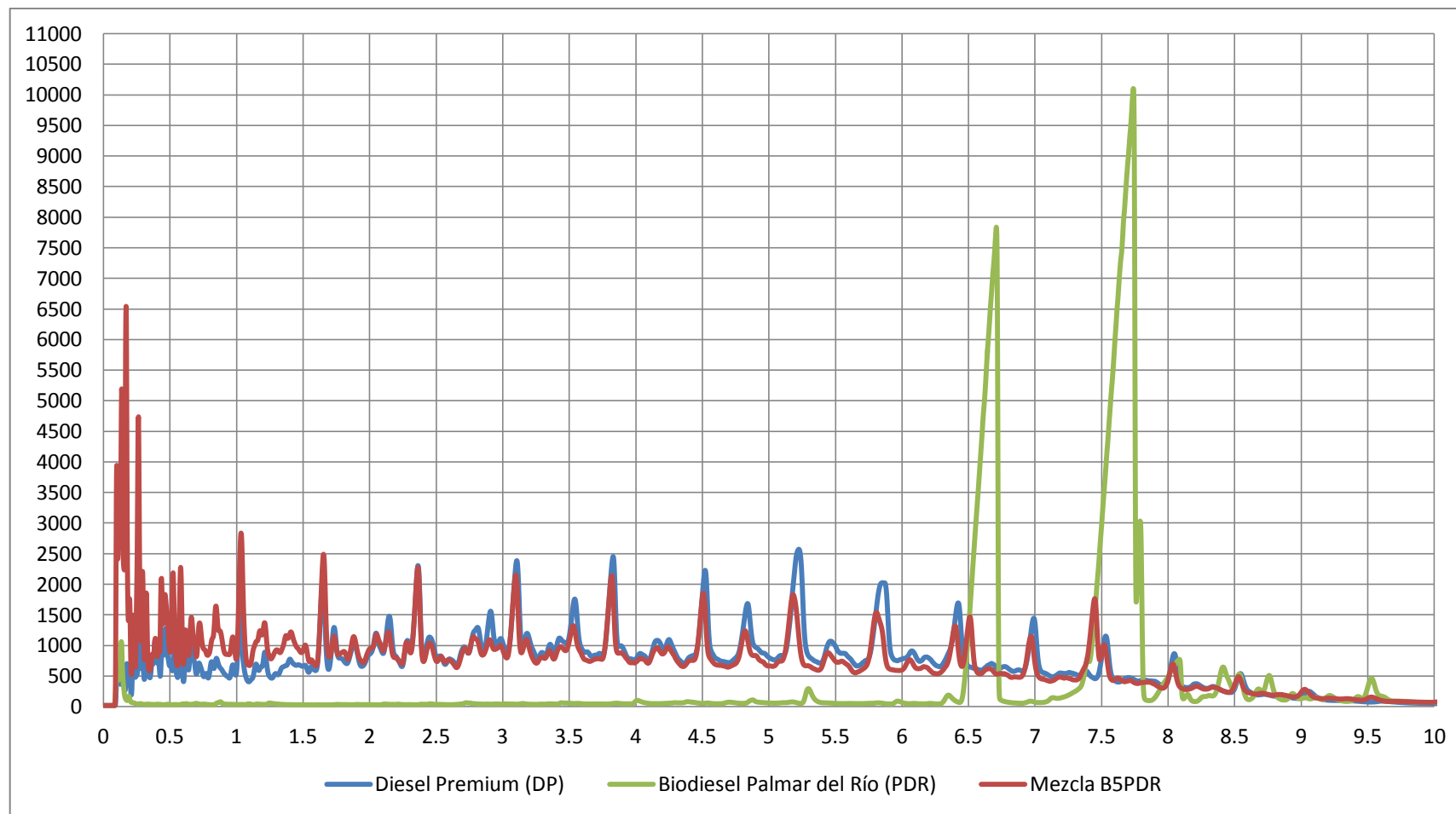


Gráfico 12. Comparación cromatográfica del DP – BPDR – B5PDR. Señal= f (Tiempo de retención)

9.3 Análisis de las emisiones contaminantes provocadas por las diferentes muestras analizadas

9.3.1 Comparación de emisiones de NOx (ppm)

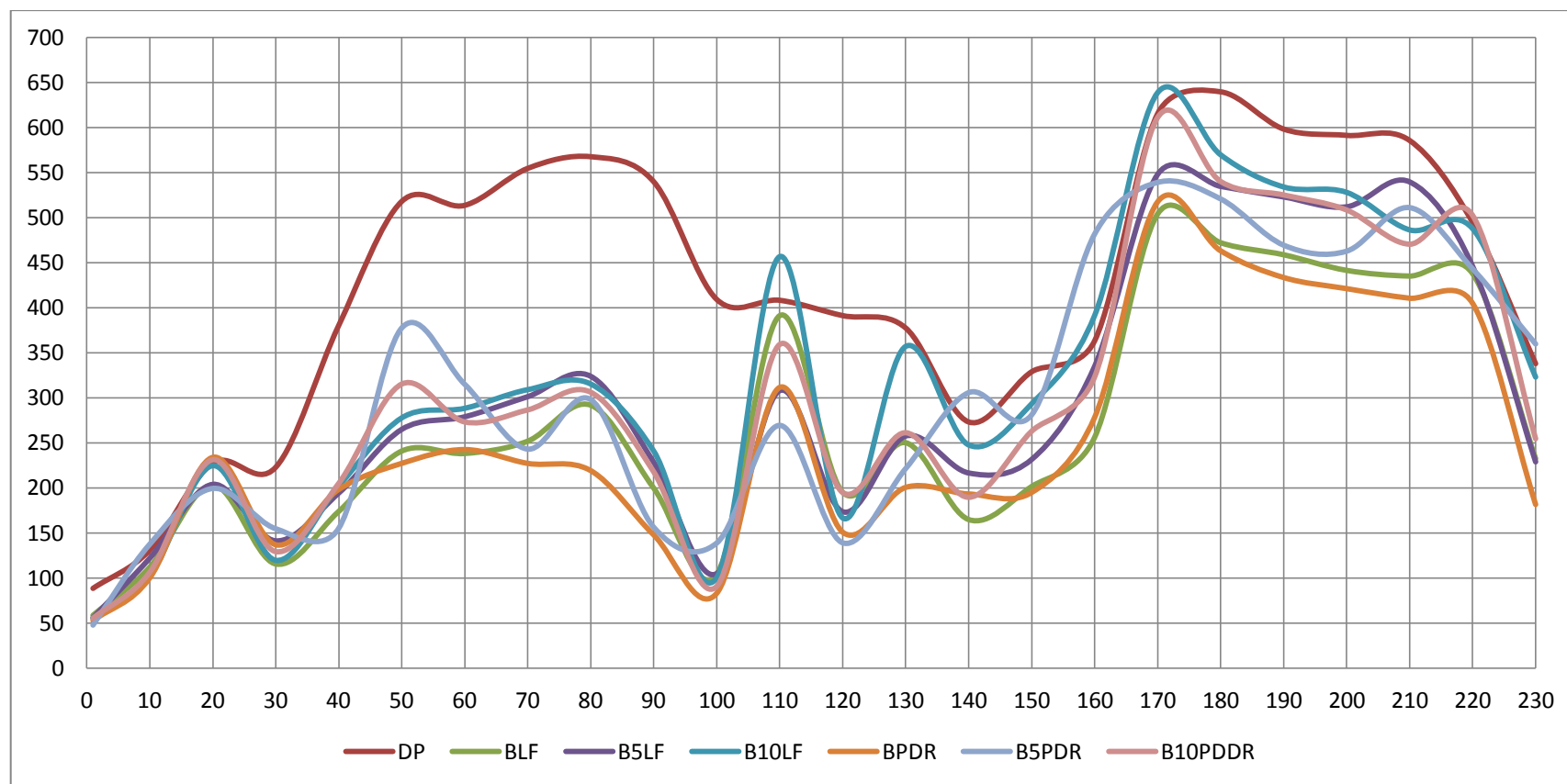


Gráfico 13. Comparación de emisiones de NOx (ppm) = f (Tiempo(s))

9.3.2 Comparación de emisiones de HC (ppm)

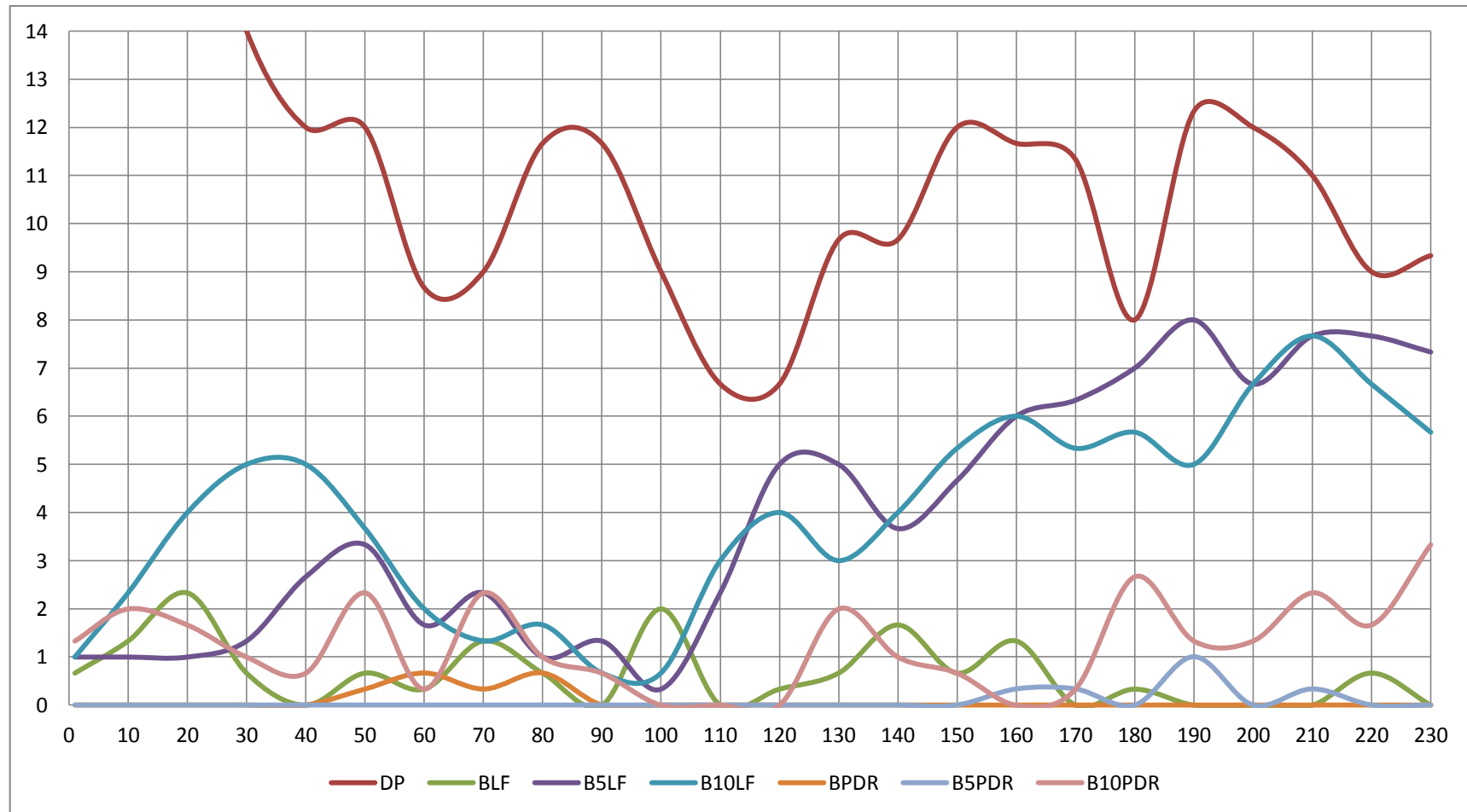


Gráfico 14. Comparación de emisiones de HC (ppm) = f (Tiempo(s))

9.3.3 Comparación de emisiones de CO (%)

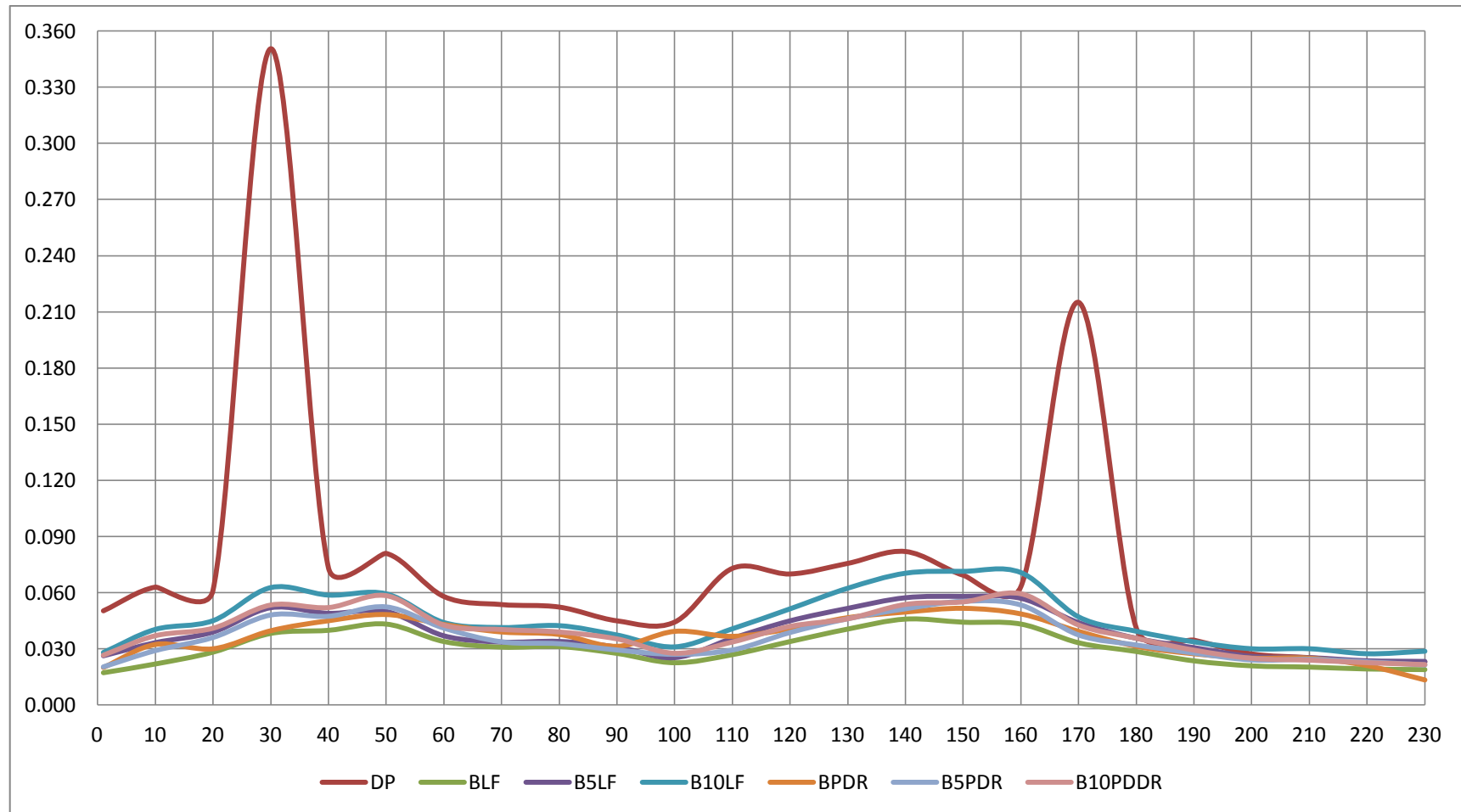


Gráfico 15. Comparación de emisiones de CO (%) = f (Tiempo(s))

9.3.4 Comparación de emisiones de CO₂ (%)

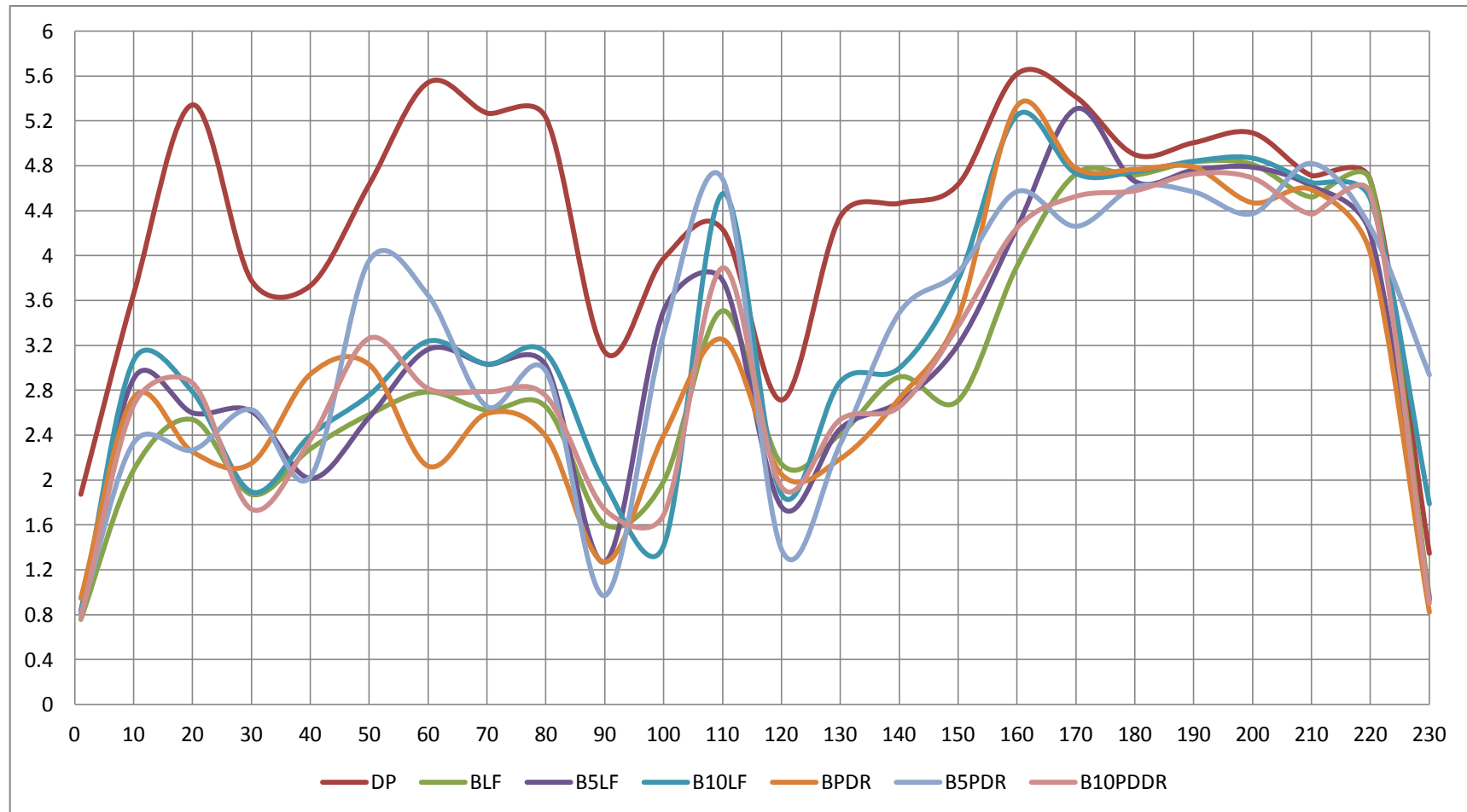


Gráfico 16. Comparación de emisiones de CO₂ (%) = f (Tiempo(s))

9.3.5 Comparación de emisiones de PM (mg/m^3)

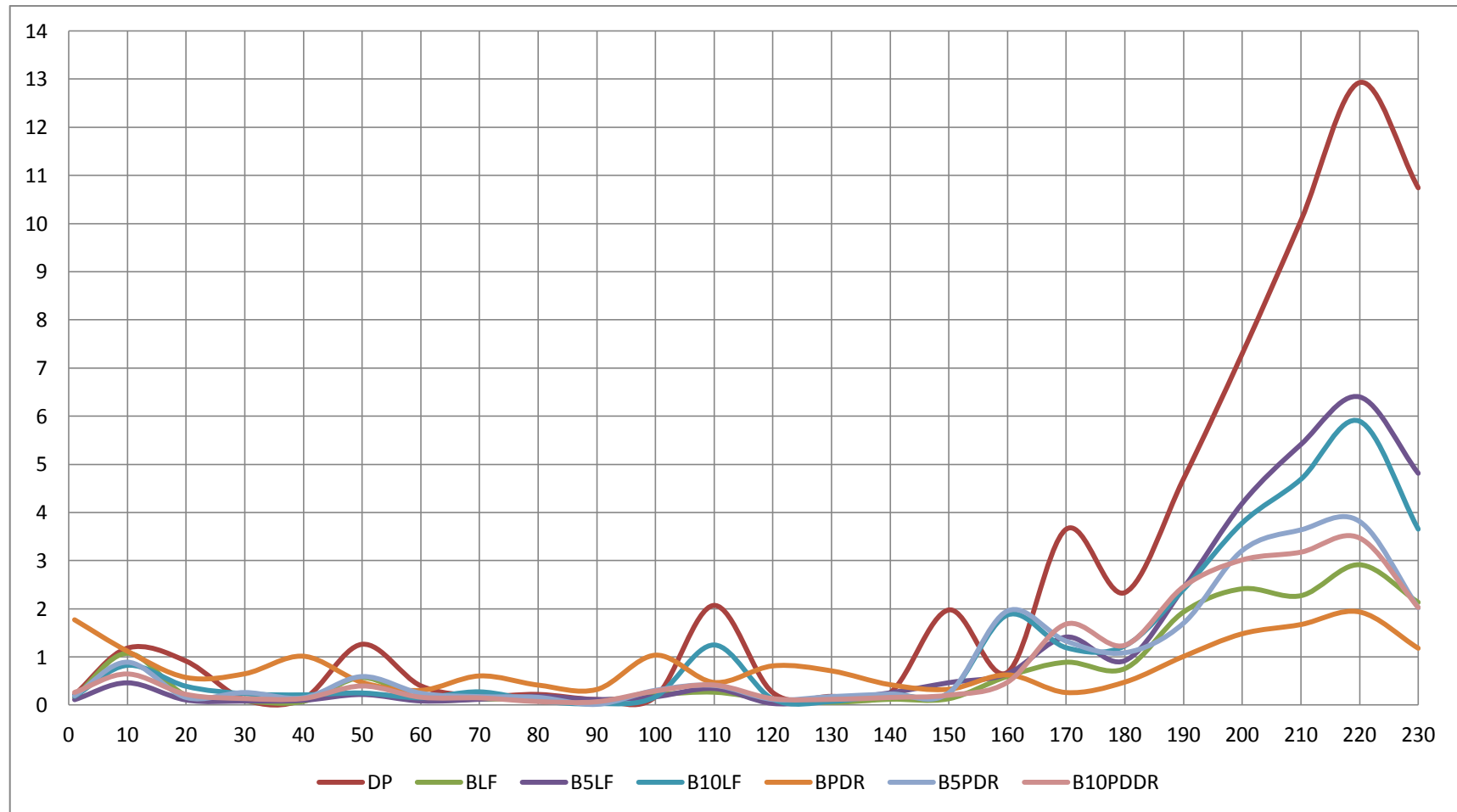


Gráfico 17. Comparación de emisiones de PM (mg/m^3) = f (Tiempo(s))

10. DISCUSIÓN

- ✓ La calidad del biodiesel obtenido en Palmar del Río difiere del biodiesel de La Fabril, lo cual se debe al proceso de obtención de cada uno, el primero es generado artesanalmente en un laboratorio y el segundo proviene de un proceso que incluye refinación a nivel industrial. Lo antes mencionado, es evidenciado en los resultados de la caracterización, al no cumplir con los valores estipulados en la Norma NTE INEN 2482-2009.
- ✓ La obtención del biodiesel en Palmar del Río es en base a experimentación, por lo que no considera un modelo estequiométrico para la determinación de las cantidades adecuadas y necesarias de cada uno de los reactivos para efectuar la reacción de trans-esterificación.
- ✓ Al almacenar el biodiesel en recipientes se observó que existe la presencia de material decantado, lo cual indica que se utilizó excesiva cantidad del catalizador (NaOH) en la reacción de trans-esterificación, generando material saponificado (jabón).
- ✓ El biodiesel de Palmar del Río presenta partículas sólidas en suspensión, lo cual se debe al proceso deficiente de filtración, ya que a través de los poros del filtro se dejó pasar partículas que interfieren en los ensayos realizados para su caracterización, provocando resultados erróneos.
- ✓ Los valores obtenidos al caracterizar las muestras combustibles pudieron ser influenciados por errores de tipo sistemáticos (equipos y materiales) al ejecutar los ensayos en el laboratorio, o por errores aleatorios debido al grado de exactitud de la persona que los ejecuta.
- ✓ El biodiesel de Palmar de Río posee alto contenido de agua, lo cual se debe a su propiedad altamente higroscópica y al no haberse eliminado completamente el agua que se utiliza para lavar el biocombustible en las etapas finales del proceso.
- ✓ El punto de inflamación del biodiesel de Palmar del Río es menor al límite permisible en la especificación de la Norma NTE INEN 2482-2009, lo cual se debe a que durante su proceso de obtención no se logró eliminar la cantidad de metanol que no reaccionó durante la transesterificación, el mismo que causa una disminución significativa en esta propiedad.

- ✓ La utilización de la cromatografía gaseosa en ausencia de estándares de trabajo y materiales de referencia se puede emplear para la determinación rápida y sencilla de la calidad del biodiesel y sus mezclas en tiempo real.
- ✓ El equipo OEM 2100 MONTANA utilizado para medir las emisiones contaminantes en fuentes móviles, mide las concentraciones de gases y material particulado simulando un recorrido dinámico, el mismo que no considera algunos factores que podrían influir en una trayectoria normal por las calles de la ciudad como: el clima, tráfico, topografía, etc.
- ✓ Actualmente en Ecuador no existe una normativa que regule las emisiones contaminantes provocadas por fuentes móviles con motor a diesel, razón por la cual no existe una base de comparación entre límites máximos permisibles y los datos obtenidos en las pruebas ejecutadas, sin embargo, en el presente trabajo se toma como referencia las emisiones provocadas por el consumo de diesel, buscando comprobar la disminución de las mismas al utilizar biodiesel y mezclas diesel-biodiesel.
- ✓ La medición de las emisiones contaminantes solamente se realizó en una fuente móvil debido a que la disponibilidad de vehículos con motor a diesel es muy limitada en la Facultad, por lo que no corresponde al tamaño de muestra representativa de la población del parque automotor en Quito. Sin embargo, se ha realizado otro tipo de propuesta, en la que estadísticamente se comprueba que los datos obtenidos con el equipo OEM 2100 MONTANA relacionados con la concentración de gases contaminantes y material particulado son totalmente representativos al presentar una diferencia significativa nula, lo cual muestra claramente que si se realiza las mediciones con más vehículos, los datos de emisiones no variarán en gran proporción.
- ✓ Los valores obtenidos relacionados con las concentraciones de emisiones contaminantes provocadas por el vehículo con motor a diesel al utilizar los combustibles establecidos, consideran errores de tipo sistemáticos y aleatorios, sin embargo, mediante el análisis estadístico se comprueba que no existe diferencia significativa entre ellos.

11. CONCLUSIONES

- ✓ La caracterización de los combustibles mediante la determinación de ciertas propiedades fisicoquímicas, permiten conocer la calidad del mismo, al cumplir o no con los límites permisibles estipulados en las correspondientes normas.
- ✓ Los valores de las propiedades fisicoquímicas del biodiesel de Palmar del Río y el biodiesel de La Fabril difieren debido a diferencias en el proceso de obtención y al grado de refinación, razón por la cual el biodiesel de Palmar del Río no cumple con las especificaciones de la Norma NTE INEN 2482-2009.
- ✓ El punto de inflamación del biodiesel de Palmar del Río es menor al límite mínimo permisible establecido por la Norma NTE INEN 2482-2009, esto se debe al contenido de agua y metanol presente en el biocombustible.
- ✓ El biodiesel de La Fabril cumple con la Norma ASTM D6751:2012, sin embargo no satisface la Norma NTE INEN 2482-2009, al poseer una viscosidad por debajo del límite mínimo permisible.
- ✓ Todas las muestras analizadas tienen un valor cualitativo denominado 1A como clasificación de la corrosión a la lámina de cobre, lo cual significa que el combustible es poco corrosivo.
- ✓ El alto contenido de agua y presencia de metanol en el biocombustible provocan la disminución del Número de Cetano, como el caso del biodiesel de Palmar del Río.
- ✓ Con relación a los Diagramas del Anexo Y, se puede decir que la densidad, punto de inflamación, viscosidad cinemática y poder calórico de las mezclas diesel-biodiesel tienden a aumentar en función del incremento de la cantidad de biodiesel que contiene la mezcla.
- ✓ Los valores de las propiedades determinadas en la caracterización de las mezclas diesel-biodiesel tienden a aproximarse a los datos del diesel debido a que existe mayor proporción de este componente en las mezclas combustibles.

- ✓ El estudio cualitativo de los cromatogramas revela que se puede utilizar esta herramienta analítica en condiciones de trabajo en tiempo real, para valorar el proceso de transesterificación, así como también determinar la presencia de monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos en función del número carbonos y el tiempo de retención. Paralelamente permite evaluar la obtención de los ésteres metílicos de ácidos grasos y en consecuencia la calidad del biodiesel.
- ✓ En la superposición de cromatogramas del Gráfico 10, se puede observar que la línea de picos correspondiente al diesel premium no coincide con de las señales de los biodiesel, a excepción de un compuesto en el tiempo de retención correspondiente a 7,5 min.
- ✓ En el Gráfico 11, se observa el comportamiento cromatográfico para el diesel premium, BLF y la mezcla B5LF, en donde la superposición de los cromatogramas se atribuyen a las probables interacciones intermoleculares asociadas a atracciones electrostáticas, puente de hidrógeno, formación de complejos orgánicos y las interacciones en la columna del cromatógrafo.
- ✓ El patrón cromatográfico del Gráfico 12, muestra señales en el tiempo de retención 6,5 – 7,9; correspondientes a la mezcla de ésteres metílicos de ácidos grasos y monoglicéridos, para el biodiesel de Palmar del Río.
- ✓ Al utilizar las muestras combustibles preparadas en la fuente móvil, no existió ninguna alteración en el comportamiento del motor, lo cual garantiza su utilización.
- ✓ Con respecto al Diagrama 13, se puede decir que las emisiones de NO_x aumentan con el incremento de la aceleración del motor, lo cual se evidencia en el gráfico al observar los picos formados y esto se debe al requerimiento de mayor cantidad de combustible/aire.
- ✓ El biodiesel está formado por ésteres de ácidos grasos, lo que justifica el aporte de oxígeno adicional al presente en el aire en su reacción de combustión, provocando la disminución de las emisiones de hidrocarburos no combustionados (HC), esto se aprecia en el Diagrama 14.
- ✓ El biodiesel de Palmar del Río, incluyendo sus mezclas diesel-biodiesel son menos contaminantes que el biodiesel de La Fabril y sus mezclas, ya que en la representación gráfica de las emisiones contaminantes en función del tiempo se observa que los valores mínimos corresponden a estos combustibles.

- ✓ En el Diagrama 17, se observa que la concentración del material particulado en todos los combustibles aumenta en el momento final del trayecto simulado, en donde ocurre la desaceleración del motor.
- ✓ Se observa que la concentración de CO del biodiesel y mezclas diesel-biodiesel, tanto de Palmar del Río como de La Fabril mantienen un rango similar que oscila entre 0,1 y 0,7. Sin embargo, la concentración de CO del diesel aumenta en los momentos de aceleración del motor. Ver Diagrama 15.
- ✓ Los valores de concentración de emisiones contaminantes no tienen diferencia significativa, por lo que son válidos y representativos en una población. Lo mencionado, es el resultado del análisis estadístico aplicado.
- ✓ Las emisiones contaminantes provocadas por el consumo de diesel son mayores que las emitidas por el consumo de la mezcla B5LF.
- ✓ La mezcla B5 de La Fabril es apta para el consumo de vehículos con motor a diesel, ya que cumple las especificaciones de la Norma NTE INEN 1489:2012. Además, ésta genera la disminución de gases como: NO_x en un 30%, HC en un 61%, CO en un 31%, CO₂ en un 29% y material particulado (PM) en un 46%.

12. RECOMENDACIONES

- ✓ Considerar un modelo estequiométrico aproximado en la reacción de trans-esterificación, de manera que se pueda determinar las cantidades exactas y adecuadas de cada uno de los reactivos. Adicionalmente, se sugiere realizar el análisis cinético de la reacción para que ésta se efectúe hasta obtener la máxima conversión.
- ✓ El proceso de obtención del biodiesel debe ejecutarse de manera correcta y adecuada, tomando en cuenta todos los factores que influyen en el mismo, de esta forma se puede garantizar la calidad del biocombustible a través del cumplimiento de las especificaciones estipuladas en su correspondiente norma.
- ✓ Se recomienda utilizar Ácido Acético en el proceso de lavado del biodiesel para neutralizar el Hidróxido de Sodio, de esta manera se logra disminuir el tiempo de lavado y el número de repeticiones. Además, se consigue eliminar fácilmente productos indeseados como jabón y catalizador en exceso.
- ✓ La etapa de filtración del biodiesel debe ser más estricta, ya que los sólidos que atraviesan los poros del filtro quedan suspendidos en el biocombustible e interfieren en la aplicación de los ensayos para su caracterización, lo cual genera errores en los resultados.
- ✓ El catalizador utilizado en la reacción de trans-esterificación (NaOH) debe estar exento de humedad para su uso, por lo que es necesario almacenarlo en un lugar hermético debido a su carácter altamente higroscópico.
- ✓ Para evitar el alto contenido de agua en el biodiesel se debe utilizar reactivos de alta pureza, este es el caso del metanol (CH_3OH). Además, se debe llevar a cabo el proceso de calentamiento para evaporar agua y metanol durante un tiempo adecuado.
- ✓ Realizar la medición de emisiones contaminantes con un tamaño de muestra representativo, tomando en cuenta los diferentes tipos de vehículos existentes en el Distrito Metropolitano de Quito con motor a diesel, de manera que se pueda analizar a profundidad el impacto ambiental al utilizar mezclas combustibles.

- ✓ Proponer y ejecutar un estudio en el que las mediciones de emisiones contaminantes provocada por fuentes móviles se la realice de forma dinámica, considerando una trayectoria determinada, condiciones ambientales, clima, tráfico, topografía, etc. Establecer una comparación con los resultados obtenidos en el presente trabajo.
- ✓ Implantar una norma que estipule los límites máximos permisibles en concentraciones de las emisiones contaminantes provocadas por fuentes móviles con motor a diesel, las mismas que deberán ser basadas en estudios y pruebas certificadas y confiables, considerando el mejoramiento de la salud de la población, dependencia de combustibles fósiles y contribución con el ambiente.
- ✓ Utilizar la cantidad adecuada de catalizador en la reacción de trans-esterificación, ya que si se encuentra en exceso se produciría una reacción de saponificación y si se encuentra en cantidad limitada la reacción no se efectuaría con facilidad.
- ✓ Suponiendo que todos los componentes han sido detectados mediante el análisis cromatográfico y que la capacidad de respuesta del detector es similar para todos los componentes se puede utilizar la siguiente expresión para obtener el %Ci interpretado en peso o molar, propios para cada pico del cromatograma.

Normalización de áreas:

$$\%Ci = \frac{A_i}{\sum_{j=1}^n A_j} * 100 \quad (46)$$

Donde:

A_i = Área del componente i

n = Número de componentes (picos detectados)

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. Análisis del ciclo de vida comparativo del biodiesel y del diesel. Análisis del ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte. Fase II. España: Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. 2006. p. 51.
- [2] MINISTERIO DE AGRICULTURA, GANADERÍA, ACUACULTURA Y PESCA (MAGAP). Información sobre la situación actual de la cadena productiva de palma africana y perspectivas de la producción de biodiesel a partir de aceite crudo de palma africana. Ecuador. 2012. p. 36.
- [3] DORADO, M. BALLESTEROS, E. ALMEIDA, J. Situación Actual y Futuro de la Biomasa. Producción de Biocombustibles líquidos. Biodiesel. CIEMAT, México, 2007. p. 39.
- [4] CASTRO, Paula. COELLO, Javier. CASTILLO, Liliana. Información base tomada del estudio denominado “Opciones para la Producción y Uso de Biodiesel en Perú”. Desarrollado por Soluciones Prácticas-ITDG, Lima, 2007. p. 43.
- [5] HENNIEGES, F. ZEDDIES, H. Uso de biocombustibles y su impacto ambiental. Editorial Reverté, Barcelona, 2006. p. 15.
- [6] FEDEBIOCOMBUSTIBLES. Biocombustibles de hoy. [En línea]. Colombia: 14 de Noviembre de 2012. [Fecha de consulta: 15 de Abril de 2013]. Disponible en: <<http://www.fedebiocombustibles.com/v3/nota-web-id-1301.htm>>
- [7] OSPINA, Juan Alexis. Emisiones gaseosas contaminantes del biodiesel obtenido de aceite de palma, soja y frituras. Trabajo de Grado. Ingeniero Químico. Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería Química. Quito. 2007. p. 25.
- [8] Diesel. [En línea]. 2013. [Fecha de consulta: 08 de Marzo de 2013]. Disponible en: <<http://es.wikipedia.org/wiki/Biodi%C3%A9sel>>

- [9] RÍOS, Luis. FRANCO, Alexander. CARDEÑO, Fernando. Síntesis de aditivos para diesel. [En línea]. Colombia, 2009. [Fecha de consulta: 10 de Mayo de 2013]. Disponible en: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s0718-7642009000600010&lang=pt>
- [10] BANCO CENTRAL DEL ECUADOR. Producción de diesel en Ecuador. 2012.
- [11] Motores Ciclo Diesel. [En línea]. 4 de Noviembre de 2010. [Fecha de consulta: 30 de Abril de 2013]. Disponible en: <<http://maqterm.blogspot.com/2010/11/ciclo-diesel.html>>
- [12] BANCO CENTRAL DEL ECUADOR. Cifras del sector petrolero ecuatoriano. [En línea]. Ecuador: 2012. [Fecha de consulta: 01 de Mayo de 2013]. Disponible en: <<https://www.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/cspe201372.pdf>>
- [13] STRAUSS, W. Contaminación del aire provocado por el uso de combustibles fósiles en vehículos. Causas, efectos y soluciones. Ed. Trillas, México, 2009. p. 61.
- [14] DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES. Toxicological profile for fuel oils. Chemical and physical information. Atlanta: Public Health Service. 2008. p. 105.
- [15] ZDAHKIEWICZ, M. Detención de gases. Teoría y práctica. Asociación de control automático, Argentina, 2010. p. 24.

BIBLIOGRAFÍA

ALBA, J. ARAUZO, J. Comparison of Methods for Estimating Critical Properties of Alkyl Esters and Its Mixtures. J. Chem. Eng. Data, 2011. 860 p.

ATADASHI, I. AROUA, M. ABDUL, A. High quality biodiesel and its diesel engine application. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 1999-2008. 7 de Septiembre de 2010.

ATIAS, Ana. Obtención de biodiesel a partir de aceites comestibles vegetales usados (ACVUs), como una alternativa para el reciclaje de material de desecho altamente contaminante para el medio ambiente. Trabajo de Grado. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos. Carrera de bioquímica. Ambato. 2012. 120 p.

Bioenergy Fuels and Chemicals from Renewable Resources European Biomass Conference. (2008, Brasil). Biofuels. 45 p.

CHANG, G. Fuel properties and emissions of African palm oil esters as diesel fuel. Journal of American Oil Chemistry Society. 49-55. 2009.

CIRIA, Ignacio. WEARCHECK IBÉRICA. Propiedades y características de combustibles diesel y biodiesel. [En línea]. [Fecha de consulta: 25 de Junio de 2013]. Disponible en: <<http://www.wearcheckiberica.es/documentacion/doctecnica/combustibles.pdf>>

DORADO, M. BALLESTEROS, E. ALMEIDA, J. Situación Actual y Futuro de la Biomasa. Producción de Biocombustibles líquidos. Biodiesel. CIEMAT, México, 2007. 85 p.

EHHER, L. VIDGA, S. Aspectos técnicos de la producción de biodiesel por transesterificación. Energía renovable y sostenible. España, 2010. 369 p.

FEDEBIOCOMBUSTIBLES. Biocombustibles de hoy. [En línea]. Colombia: 14 de Noviembre de 2012. [Fecha de consulta: 15 de Abril de 2013]. Disponible en: <<http://www.fedebiocombustibles.com/v3/nota-web-id-1301.htm>>

FREEDMAN, B. BUTTERFIELD, R. PRYDE, E. Transesterification kinetics of African palm oil. Journal of American Oil Chemical Society. 75-80. 2008.

FONTARAS, G. KOUSOULIDOU, M. Environmental Pollution. Effects of low concentration biodiesel blend application on modern passenger cars. Part 1: Feedstock impact on regulated pollutants, fuel consumption and particle emissions. 1451–1460. Mayo de 2010.

FUDUKA, H. KONDO, A. NODA, H. Producción de combustible biodiesel por transesterificación de aceites. Biosci, 2009. 168 p.

GARCÍA, Juan Manuel. GARCIA, Juan Ángel. Biocarburantes líquidos. Biodiesel-Bioetanol. [En línea]. Madrid: 2010. [Fecha de consulta: 20 de Marzo de 2013]. Disponible en: <http://www.energiasrenovables.ciemat.es/adjuntos_documentos/VT_biodiesel_y_bioetanol.pdf>

GARCÍA, M. PEÑA, J. Comparison of predictive models for the esterification and transesterification reactions in biodiesel production. (USA, 2012). Application in a production plant simulation. 184 p.

GUERRERO, Guillermo. Sustitución parcial de diesel con aceite de colza. Trabajo de Grado. Ingeniero Químico. Universidad Central del Ecuador. Quito. 1993. 89 p.

GHESTI, Grace. Producao de biodiesel via transesterificacao etílica com zeolitas básicas. Quimica Nova. Brazil. 2012. 123 p.

IICA. Manual de biocombustibles. [En línea]. Argentina: 2012. [Fecha de consulta: 10 de Julio de 2013]. Disponible en: <http://www.iica.int/Esp/regiones/sur/argentina/Documents/2012/Publicaciones/ManualBiocombustibles_ARPEL_IICA.pdf>

KRAHL, J. KNOTHE, G. MUNACK, A. Comparison of exhaust emissions from the combustion of biodiesel, vegetable oil, gas-to-liquid and petrodiesel fuels. USA, 2010. 70 p.

LAFONT, Jennifer. PÁEZ, Manuel. Análisis Químico de mezclas de biodiesel de aceite de cocina usado y diesel por espectroscopia infrarroja. 2011. 753 p.

LA FABRIL S.A. Biodiesel. [En línea]. Ecuador, 2013. [Fecha de consulta: 30 de Junio de 2013]. Disponible en: <http://www.lafabril.com.ec/lafabril/industriales_biodiesel.php>

LIND, Douglas. MARCHAL, William. WATHEN, Samuel. Estadística aplicada a los negocios y la economía. Mc. Graw-Hill, México, 2008. 420 p.

LIU, Y. DÍAZ, C. GANI, R. Selección de métodos de predicción de las propiedades fisicoquímicas de Modelado de Procesos y Diseño de Producto de la fabricación de biodiesel. USA, 2011. 836p.

11th Mediterranean Congress of Chemical Engineering. (España, Octubre de 2008). Biodiesel production. 20 p.

Ministerio de Energía y Competitividad. Portal de Energías Renovables. [En línea]. España: 2012. [Fecha de consulta: 13 de Marzo de 2013]. Disponible en: http://www.energiasrenovables.ciemat.es/?pid=3000&id_seccion=12&dir=documentos

Ministerio de Minas y Energías en la República de Colombia. Cuéllar, Mónica. (Colombia, 2010). Características de biodiesel de palma y las mezclas. Foro Nacional. 15p.

OSPINA, Juan Alexis. Emisiones gaseosas contaminantes del biodiesel obtenido de aceite de palma, soja y frituras. Trabajo de Grado. Ingeniero Químico. Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería Química. Quito. 2007. 127 p.

PUNA, Jaime. NEIVA, Maria. SOARES Ana. Reac. Kinet. Biodiesel production from waste frying oils over lime catalysts. Marzo, 2013.

RÍOS, Luis. FRANCO, Alexander. CARDEÑO, Fernando. Síntesis de aditivos para diesel. [En línea]. Colombia, 2009. [Fecha de consulta: 10 de Mayo de 2013]. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s0718-07642009000600010&lang=pt

SÁNCHEZ, Carlos. Estudio de la factibilidad para la elaboración de biodiesel a partir de aceite de palma africana en Ecuador. Trabajo de Grado. Ingeniero en Agroempresas. Universidad San Francisco de Quito. Quito. Noviembre de 2007. 25p.

SANFORD, S. WHITE, J. SHAH, P. WEE, C. Feedstock and Biodiesel Characteristics Report. Renewable Energy Group, New York, 2009. 234p.

Síntesis de la legislación de la UE. Medio Ambiente. Contaminación atmosférica. Reducción de las emisiones contaminantes de los vehículos ligeros. [En línea]. 29 de Marzo de 2013. [Fecha de consulta: 02 de Julio de 2013]. Disponible en: <http://europa.eu/legislation_summaries/environment/air_pollution/l28186_es.htm>

SOETAREDJO, Felicia. AYUCITRA, Aning. KOH/bentonite catalyst for transesterification of palm oil to biodiesel. Applied Clay Science. 2011. 346 p.

WAN, Zuraida. HANEED, B. Transesterification of palm oil to methyl ester on activated carbon supported calcium oxide catalyst.. Bioresource Technology. 2011. 2664 p.

WUTTICHAJ, Roschat. MATTANA, Kacha. BOONYAWAN, Yoosuk. TAWEEESAK, Sudyoadsuk. Biodiesel production base don heterogeneous process catalyzed by solid waste coral fragment. Fuel. 2012. 202 p.

YUAN, W. HANSEN, A. ZHANG, Q. Predicción de las propiedades físicas de biodiesel para la combustión de modelado. Oxford, 2009. 593p.

ANEXOS

ANEXO A

Tabla A.1. Propiedades de los combustibles de ésteres

Ester	CN	HG (kJ /kg)	Viscosidad (mm² / s)	CP (° C)	PP (° C)	FP (° C)
<i>Metilo</i>						
Semilla de algodón	51,2	-	6,8 (21deg)	-	-4	110
Colza	54,4	40449	6,7 (40deg)	-2	-9	84
Cártamo	49,8	40060	-	-	-6	180
Soja	46,2	39800	4,08 (40deg)	2	-1	171
Girasol	46,6	39800	4,22 (40deg)	0	-4	-
Sebo	-	39949	4,11 (40deg)	12	9	96
<i>Etílico</i>						
Palma	56,2	39070	4,5 (37.8deg)	8	6	19
Soja	48,2	40000	4,41 (40deg)	1	-4	174
Sebo	-	-	-	15	12	-

FUENTE: KNOTHE, G., DUNN, RO. y BAGBY, MO. Biodiesel: el uso de aceites vegetales y sus derivados como combustibles diesel alternativos. Combustibles y productos químicos a partir de biomasa. American Chemical Society, Washington, 2008. p. 37.

Definición de la simbología:

CN = Número de cetano

HG = Poder Calórico

CP = Punto de nube

PP = Punto de fluidez

FP = Punto de inflamación

ANEXO B

Tabla B.1. Norma EN 14214-08. Especificación para biodiesel

Propiedad	Unidad	Mínimo	Máximo
Contenido de éster	% (m/m)	96,5	-
Densidad a 15 °C	kg/m ³	860	900
Viscosidad a 40 °C	mm ² /s	3,5	5,0
Punto de inflamación	°C	>101	-
Contenido de azufre	mg/kg	-	10
Residuo carbonoso	% (m/m)	-	0,3
Índice de cetano	-	51,0	-
Contenido en cenizas de sulfatos	% (m/m)	-	0,02
Contenido de agua	mg/kg	-	500
Contaminación total	mg/kg	-	24
Corrosión en lámina de cobre	clasificación	Clase 1	Clase 1
Estabilidad a la oxidación, 110 °C	horas	6	-
Valor ácido	mg KOH/g	-	0,5
Índice de yodo	-	-	120
Metiléster linolénico	% (m/m)	-	12,0
Metiléster poliinsaturado	% (m/m)	-	1
Contenido en metanol	% (m/m)	-	0,20
Contenido en monoglicéridos	% (m/m)	-	0,80
Contenido en diglicéridos	% (m/m)	-	0,20
Contenido en triglicéridos	% (m/m)	-	0,20
Glicerina libre	% (m/m)	-	0,02
Glicerina total	% (m/m)	-	0,25
Metales grupo I (Na+K)	mg/kg	-	5,0
Metales grupo II (Ca+Mg)	mg/kg	-	5,0
Contenido en fósforo	mg/kg	-	10,0

FUENTE: Comité Europeo de Normalización. Norma EN 14214-08. Especificación para biodiesel. Publicación Noviembre de 2008. p. 2.

ANEXO C

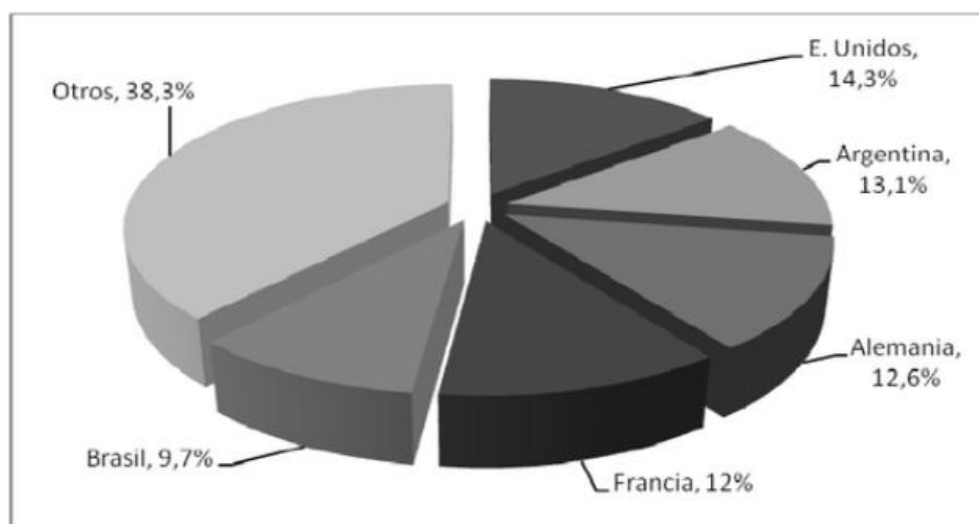
Tabla C.1. Norma ASTM D6751-12. Especificación estándar para mezclas de combustible biodiesel (B100) para los combustibles destilados medios

Propiedad	Límites	Unidad
Punto de inflamación	130,0 mín.	°C
Agua y sedimentos	0,050 máx.	% vol
Viscosidad cinemática a 40 °C	1,9 – 6,0	mm ² /seg
Cenizas sulfatadas	0,020 máx.	% masa
Azufre (Grado S 15)	0,0015 máx.	ppm
Azufre (Grado S 500)	0,05 máx.	ppm
Corrosión en lámina de cobre	N° 3 máx.	-
Índice de cetano	47 mín.	-
Punto de enturbiamiento	A informar por cliente	°C
Residuo carbonoso	0,050 máx.	% masa
Acidez	0,80 máx.	mg KOH/g
Glicerina libre	0,020 máx.	% masa
Glicerina total	0,240 máx.	% masa
Contenido de fósforo	0,001 máx.	% masa
Temperatura de destilación, equivalente en temperatura atmosférica, 90% recuperado	360 máx.	°C

FUENTE: American Society of Testing and Materials (ASTM). Norma ASTM D6751-12. Especificación estándar para mezclas de combustible biodiesel (B100) para los combustibles destilados medios. Publicación 2012. p. 2.

ANEXO D

Tabla D.1. Principales países productores de biodiesel. Estimación del 2010.



FUENTE: América Economía. Producción de biocombustibles. [En línea]. 2011. [Fecha de consulta: 02 de Noviembre de 2013]. Disponible en: <<http://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/brasil-argentina-y-colombia-lideran-la-produccion-de-biocombustibles-en-america->>

ANEXO E

Tabla E.1. Rendimiento de diferentes cultivos

Cultivo	Litros/hectárea
Palma	4752
Alga	3000
Cocotero	2151
Jatropha	2000
Colza	954
Árbol de sebo	907
Maní	842
Girasol	767
Soja	922
Maíz	700
Cañamo	242

FUENTE: KIRK Othmer, Encyclopedia of chemical technology, “Vegetable Oil”, 2005. p. 15.

ANEXO F

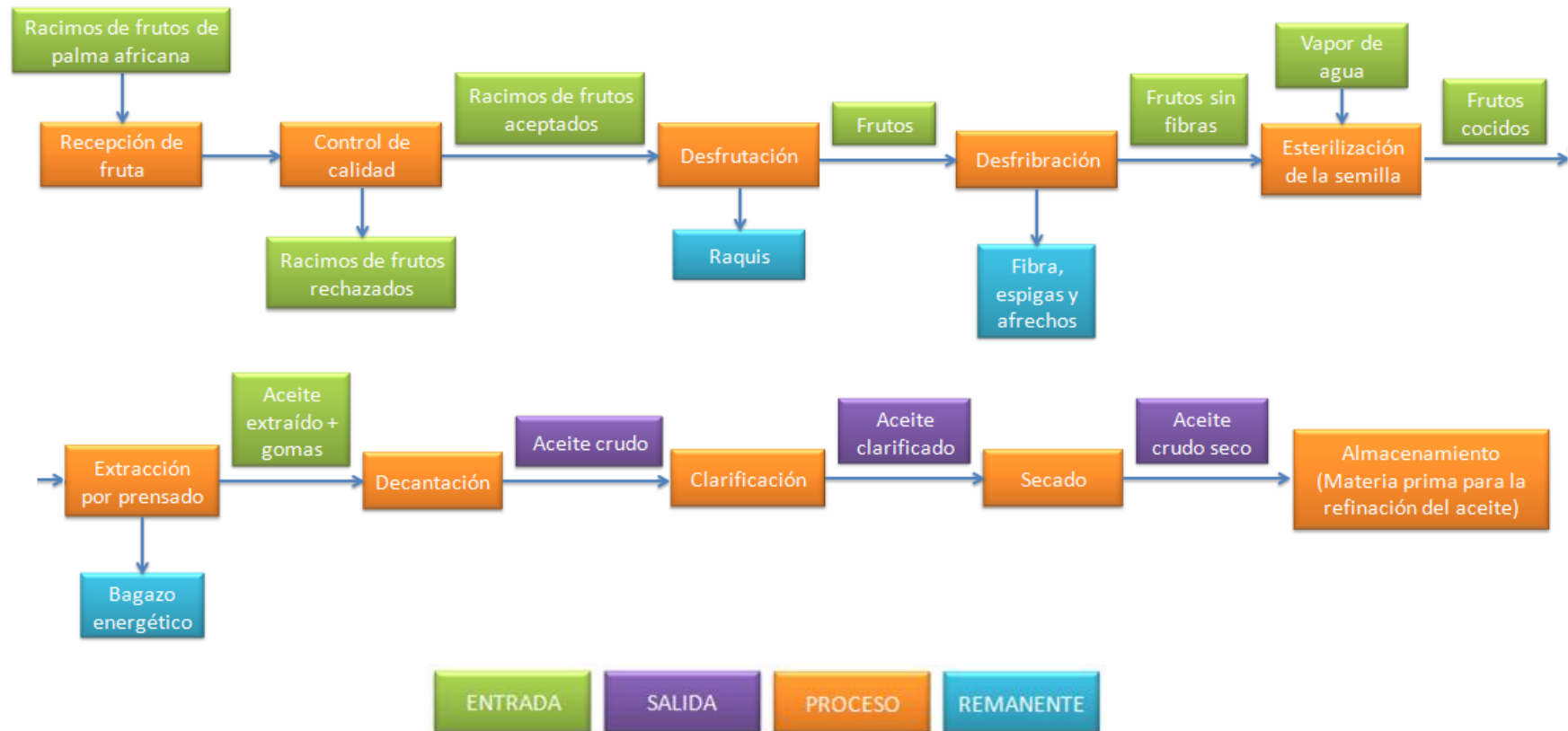


Figura F.1. Obtención del aceite crudo seco de palma africana en La Fabril

ANEXO G

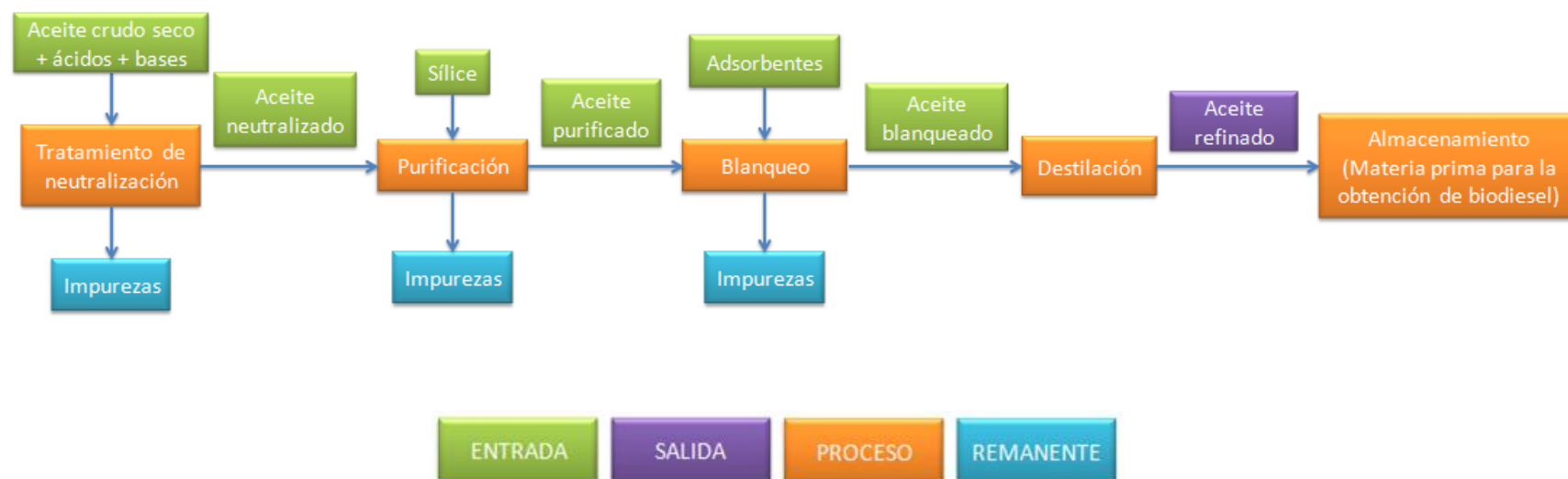


Figura G.1. Obtención del aceite refinado en La Fabril

ANEXO H

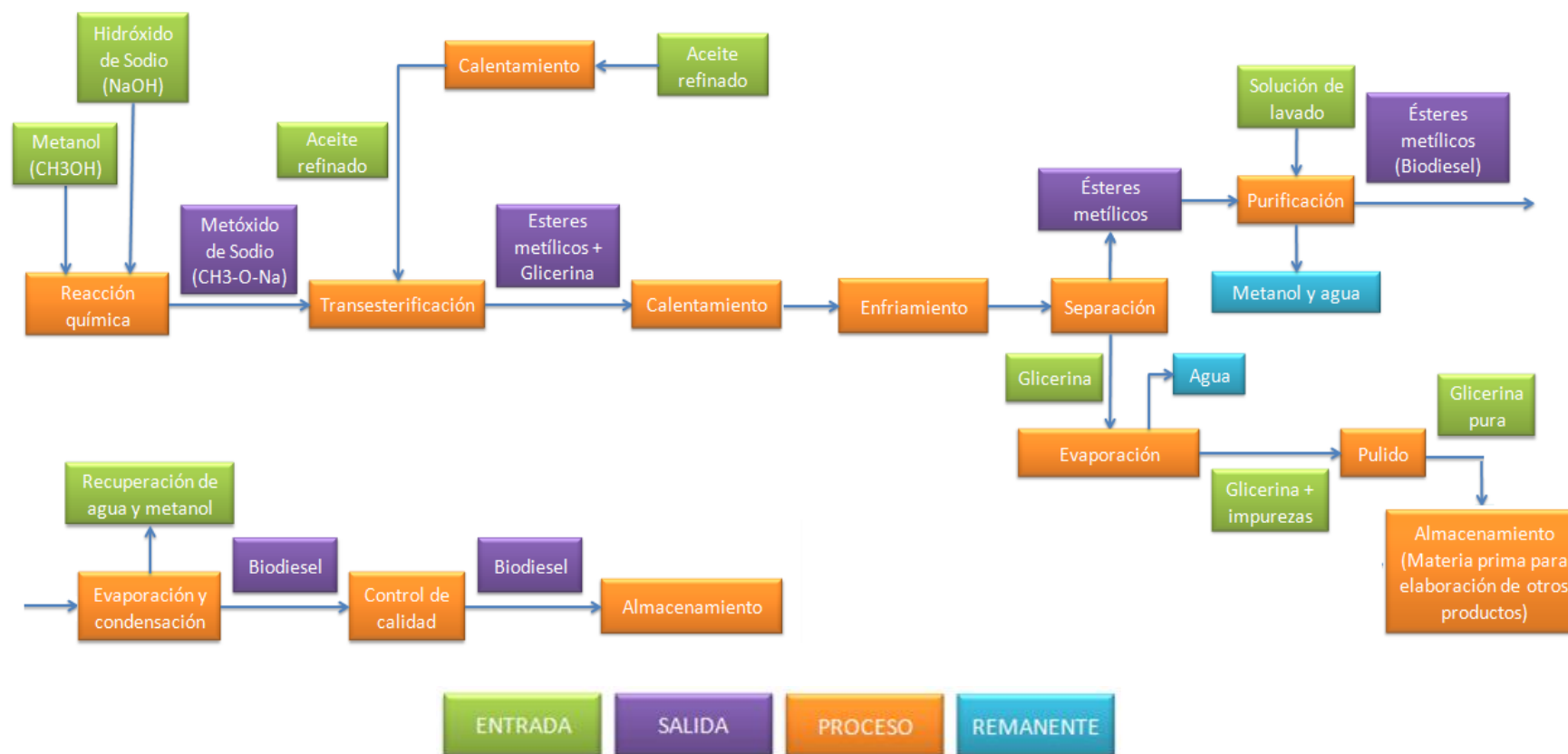


Figura H.1. Obtención del biodiesel en La Fabril

ANEXO J

Tabla J.1. Adopción de la especificación de bajo contenido de azufre

PAIS	FECHA DE IMPLANTACIÓN
Suecia	Enero de 1991
Dinamarca	Julio de 1992
Finlandia	Julio de 1993
EUA (Inc. California)	Octubre de 1993
Suiza	Enero de 1994
Noruega	Enero de 1994
Canadá	Octubre de 1994
México	Octubre 1993
Austria	Octubre de 1995
Taiwán	Enero de 1997
Japón	Mayo de 1997
Corea del Sur	Enero de 1998
Tailandia	Enero de 2000

FUENTE: LEIVA Miguel, RODRIGUEZ Nuncio. PEMEX. El diesel. [En línea]. México. [Fecha de consulta: 21 de Abril de 2013]. Disponible en: <<http://www.ref.pemex.com/octanaje/24DIESEL.htm>>

Nota: En la tabla se muestra las fechas en las que los principales países han adoptado el 0.05 por ciento como máximo en el límite de azufre en el diesel.

ANEXO K

Tabla K.1. Estimación oferta demanda de diesel automotriz en Ecuador

AÑO	DEMANDA NACIONAL		PRODUCCIÓN NACIONAL	IMPORTACIÓN	%
	BLS	TM	BLS	BLS	
2013	19.500.000	2.758.133	6.694.000	12.806.000	65,67%
2014	20.587.000	2.911.881	6.320.000	14.267.000	69,30%
2015	21.913.000	3.099.434	7.662.000	14.251.000	65,03%
2016	23.218.000	3.284.017	7.684.000	15.534.000	66,90%
2017	24.608.000	3.480.622	18.299.000	6.309.000	25,64%
2018	26.105.000	3.692.362	26.105.000	0	0,00%
2019	27.702.000	3.918.246	27.702.000	0	0,00%
2020	29.373.000	4.154.597	29.373.000	0	0,00%

Fuente: ORDENANA Xavier. Informe final de Consultoría para el Ministerio Coordinador de Producción, Empleo y Competitividad. Determinación de la Metodología para la fijación del precio del galón de biodiesel en el mercado interno del Ecuador. 2013.

ANEXO L

Tabla L.1. Proyecciones introducción gradual de biodiesel en el Ecuador

FECHA	ZONA DE INFLUENCIA	MEZCLA BLS	BIODIESEL BLS	MEZCLA B (%)	MERCADO CON BIODIESEL (%)	SUBSIDIO (USD/AÑO)
oct-13	Guayas, Los Ríos, El Oro	1.502.195	75.110	5%	11%	6.485.000
	Cuenca, Loja	648.656	32.433	5%		
	TOTAL	2.150.851	107.543	5%		
ene-14	Guayas, Los Ríos, El Oro	6.292.016	314.601	5%	55%	34.377.000
	Cuenca, Loja	2.716.926	135.846	5%		
	Santo Domingo	2.393.050	119.652	5%		
	TOTAL	11.401.992	570.099	5%		
ene-15	Guayas, Los Ríos, El Oro	6.697.282	334.864	5%	55%	36.591.000
	Cuenca, Loja	2.891.922	144.596	5%		
	Santo Domingo	2.547.185	127.359	5%		
	TOTAL	12.136.389	606.819	5%		
ene-16	Guayas, Los Ríos, El Oro	7.096.130	709.613	10%	100%	83.006.000
	Cuenca, Loja	3.064.146	306.415	10%		
	Santo Domingo	2.698.879	134.944	5%		
	Península, Galápagos	559.411	11.188	2%		
	Manta	1.150.537	23.011	2%		
	Esmeraldas	440.962	8.819	2%		
	Quito, Ambato	7.000.837	140.017	2%		
	Riobamba	593.908	11.878	2%		
	Shushufindi	613.190	30.660	5%		
	TOTAL	23.218.000	1.376.544	5,93%		
ene-17	Guayas, Los Ríos, El Oro	7.520.956	752.096	10%	100%	98.559.000
	Cuenca, Loja	3.247.588	324.759	10%		
	Santo Domingo	2.860.454	286.045	10%		
	Península, Galápagos	592.902	11.858	2%		
	Manta	1.219.416	24.388	2%		
	Esmeraldas	467.361	9.347	2%		
	Quito, Ambato	7.419.959	148.399	2%		
	Riobamba	629.463	12.589	2%		
	Shushufindi	649.900	64.990	10%		

Tabla L.1 (Continuación)

	TOTAL	24.607.999	1.634.472	6,64%		
ene-18	Guayas, Los Ríos, El Oro	7.978.485	797.849	10%	100%	104.554.000
	Cuenca, Loja	3.445.151	344.515	10%		
	Santo Domingo	3.034.467	303.447	10%		
	Península, Galápagos	628.971	12.579	2%		
	Manta	1.293.598	25.872	2%		
	Esmeraldas	495.792	9.916	2%		
	Quito, Ambato	7.871.344	157.427	2%		
	Riobamba	667.756	13.355	2%		
	Shushufindi	689.436	68.944	10%		
	TOTAL	26.104.999	1.733.903	6,64%		
ene-19	Guayas, Los Ríos, El Oro	8.466.577	1.269.987	15%	100%	159.414.000
	Cuenca, Loja	3.655.912	548.387	15%		
	Santo Domingo	3.220.103	483.015	15%		
	Península, Galápagos	667.448	13.349	2%		
	Manta	1.372.735	27.455	2%		
	Esmeraldas	526.123	10.522	2%		
	Quito, Ambato	8.352.881	167.058	2%		
	Riobamba	708.606	14.172	2%		
	Shushufindi	731.613	109.742	15%		
	TOTAL	27.701.999	2.643.687	9,54%		
ene-20	Guayas, Los Ríos, El Oro	8.977.286	1.346.593	15%	100%	169.030.000
	Cuenca, Loja	3.876.439	581.466	15%		
	Santo Domingo	3.414.342	512.151	15%		
	Península, Galápagos	707.709	14.154	2%		
	Manta	1.455.539	29.111	2%		
	Esmeraldas	557.859	11.157	2%		
	Quito, Ambato	8.856.732	177.135	2%		
	Riobamba	751.350	15.027	2%		
	Shushufindi	775.744	116.362	15%		
	TOTAL	29.373.001	2.803.155	9,54%		

Fuente: ORDENANA Xavier. Informe final de Consultoría para el Ministerio Coordinador de Producción, Empleo y Competitividad. Determinación de la Metodología para la fijación del precio del galón de biodiesel en el mercado interno del Ecuador. 2013.

ANEXO M

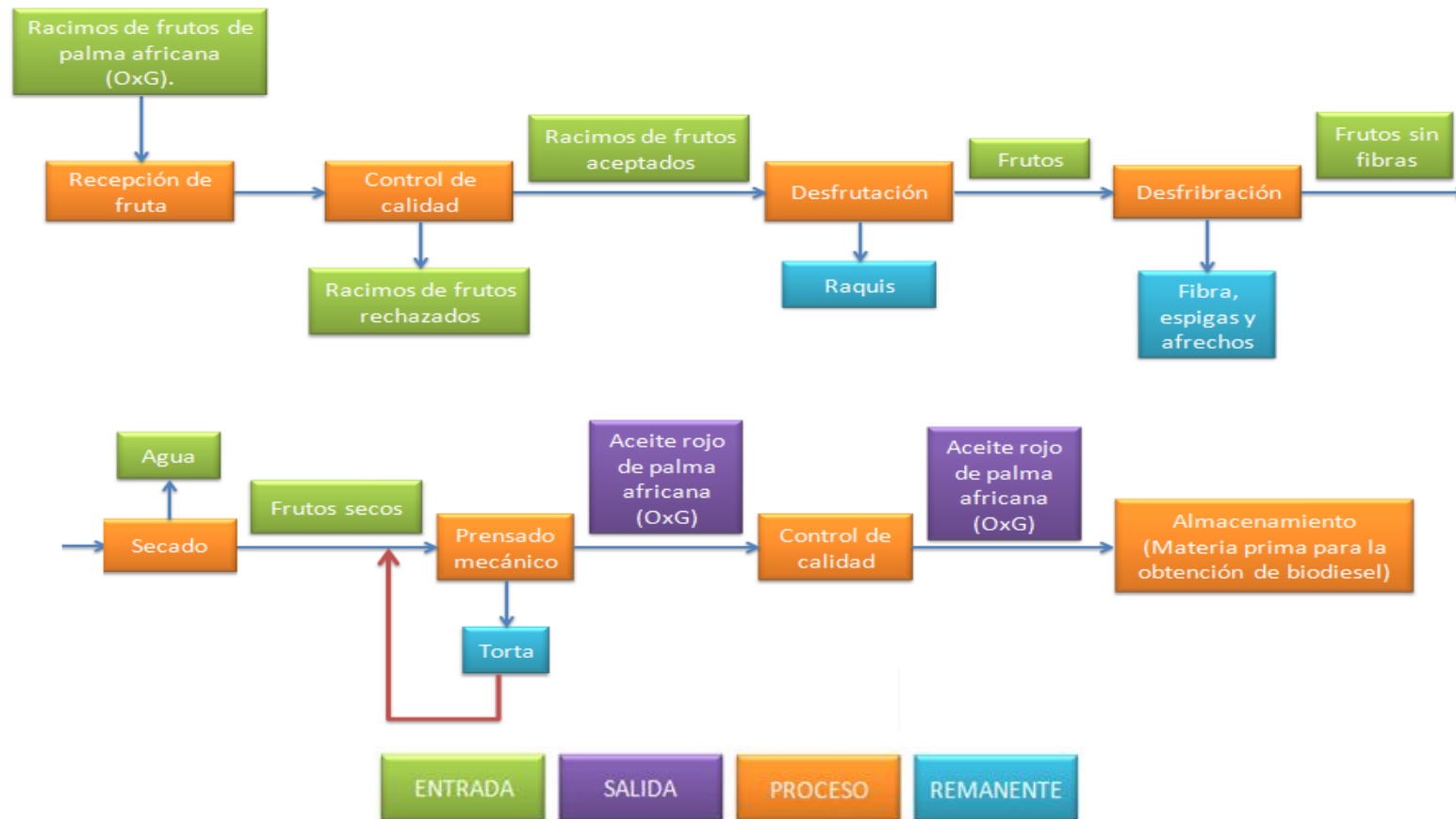







Figura M.1. Obtención del aceite rojo de palma africana *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis* (OxG)

ANEXO N

Fotografías de la obtención del aceite rojo de palma africana *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis* (OxG)

		
<p>Fig. N.1. Recepción de fruta</p>	<p>Fig. N.2. Desfrutación y desfibración</p>	<p>Fig. N.3. Secado</p>
		
<p>Fig. N.4. Prensado mecánico</p>	<p>Fig. N.5. Torta</p>	<p>Fig. N.6. Aceite OxG</p>

ANEXO P

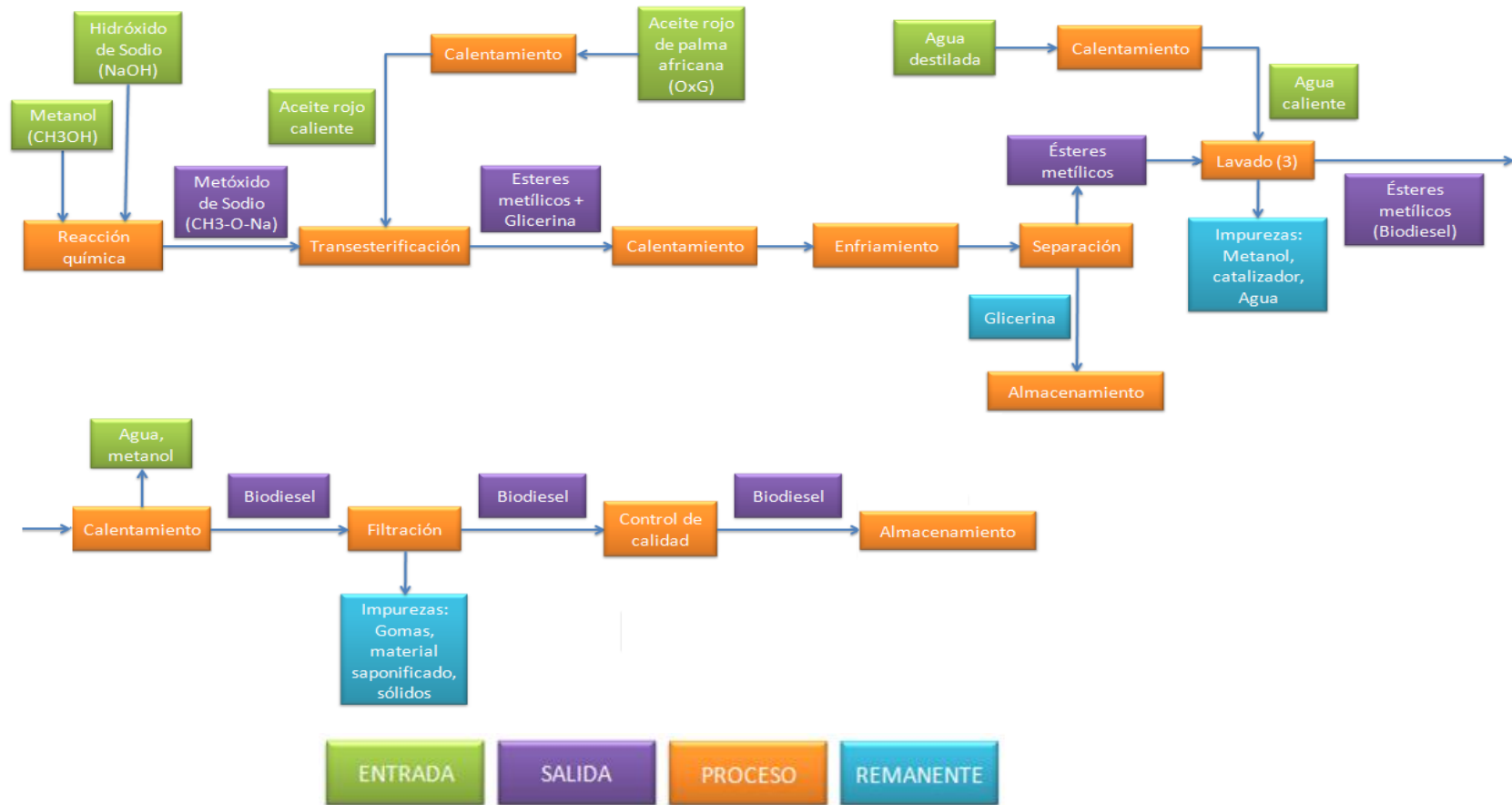








Figura P.1. Obtención del biodiesel en Palmar del Río

ANEXO Q

Fotografías de la obtención del biodiesel en Palmar del Río

		
<p>Fig. Q.1. Reacción química: Metanol+Soda</p>	<p>Fig. Q.2. Calentamiento aceite OxG</p>	<p>Fig. Q.2. Transesterificación</p>
		
<p>Fig. Q.4. Separación</p>	<p>Fig. Q.5. Lavado</p>	<p>Fig. Q.6. Calentamiento</p>

ANEXO Q (Continuación)



Fig. Q.7. Reacción química







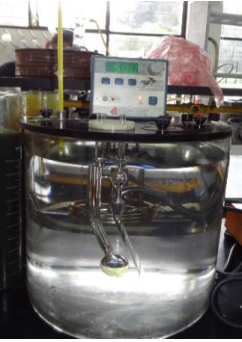

Fig. Q.8. Calentamiento aceite OxG



Fig. Q.9. Filtración y almacenado de biodiesel

ANEXO R

Fotografías de equipos utilizados en los ensayos para la caracterización de las muestras

		
<p>Fig. R.1. Densidad API - FIQ-UCE</p>	<p>Fig. R.2. Punto de inflamación - FIQ-UCE</p>	<p>Fig. R.3. Φ agua y sedimentos - FIQ-UCE</p>
		
<p>Fig. R.4. Destilación ASTM - FIQ-UCE</p>	<p>Fig. R.5. Viscosidad cinemática - FIQ-UCE</p>	<p>Fig. R.6. Contenido de azufre - FIQ-UCE</p>

Anexo R (Continuación)



Fig. R.7. Corrosión a la lámina de Cu - FIQ-UCE



Fig. R.8. Poder calórico - FIQ-UCE

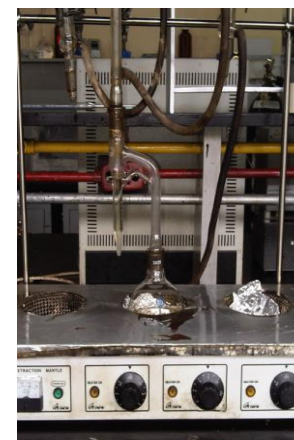


Fig. R.9. Agua por destilación - FIQ-UCE



Fig. R.10. Absorción atómica - FIQ-UCE



Fig. R.11. Cromatografía - FIQ-UCE

ANEXO S

Fotografías de implementos para medir emisiones contaminantes en una fuente móvil



Fig. S.1. Fuente móvil: Vehículo de prueba



Fig. S.2. Equipo OE 2100 MONTANA adaptado al tubo de escape



Fig. S.3. Ordenador del equipo OEM 2100 MONTANA



Fig. S.4. Dinamómetro

ANEXO T

Tabla T.1. Valores críticos para la Distribución t de Student

gr	Intervalo de confianza, c					
	80%	90%	95%	98%	99%	99.9%
	Nivel de significancia para una prueba de una cola, α					
	0.100	0.050	0.025	0.010	0.005	0.0005
	Nivel de significancia para una prueba de dos colas, α					
	0.200	0.10	0.05	0.02	0.01	0.001
36	1.306	1.688	2.028	2.434	2.719	3.582
37	1.305	1.687	2.026	2.431	2.715	3.574
38	1.304	1.686	2.024	2.429	2.712	3.566
39	1.304	1.685	2.023	2.426	2.708	3.558
40	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551
41	1.303	1.683	2.020	2.421	2.701	3.544
42	1.302	1.682	2.018	2.418	2.698	3.538
43	1.302	1.681	2.017	2.416	2.695	3.532
44	1.301	1.680	2.015	2.414	2.692	3.526
45	1.301	1.679	2.014	2.412	2.690	3.520
46	1.300	1.679	2.013	2.410	2.687	3.515
47	1.300	1.678	2.012	2.408	2.685	3.510
48	1.299	1.677	2.011	2.407	2.682	3.505
49	1.299	1.677	2.010	2.405	2.680	3.500
50	1.299	1.676	2.009	2.403	2.678	3.496
51	1.298	1.675	2.008	2.402	2.676	3.492
52	1.298	1.675	2.007	2.400	2.674	3.488
53	1.298	1.674	2.006	2.399	2.672	3.484
54	1.297	1.674	2.005	2.397	2.670	3.480
55	1.297	1.673	2.004	2.396	2.668	3.476
56	1.297	1.673	2.003	2.395	2.667	3.473
57	1.297	1.672	2.002	2.394	2.665	3.470
58	1.296	1.672	2.002	2.392	2.663	3.466
59	1.296	1.671	2.001	2.391	2.662	3.463
60	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.460
61	1.296	1.670	2.000	2.389	2.659	3.457
62	1.295	1.670	1.999	2.388	2.657	3.454
63	1.295	1.669	1.998	2.387	2.656	3.452
64	1.295	1.669	1.998	2.386	2.655	3.449
65	1.295	1.669	1.997	2.385	2.654	3.447
66	1.295	1.668	1.997	2.384	2.652	3.444
67	1.294	1.668	1.996	2.383	2.651	3.442
68	1.294	1.668	1.995	2.382	2.650	3.439
69	1.294	1.667	1.995	2.382	2.649	3.437
70	1.294	1.667	1.994	2.381	2.648	3.435

FUENTE: LIND, Douglas. Marchal, William. Wathen, Samuel. Estadística aplicada a los negocios y la economía. Mc. Graw-Hill, México, 2008. p.785.

ANEXO U

Tabla U.1. Valores críticos para la Distribución F en un nivel de significancia de 5%

		Grados de libertad para el numerador															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40
Grados de libertad para el denominador	1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	244	246	248	249	250	251
	2	18.5	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.5	19.5	19.5
	3	10.1	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59
	4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72
	5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46
	6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77
	7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34
	8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04
	9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83
	10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66
	11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53
	12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43
	13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34
	14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27
	15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20
	16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15
	17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10
	18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06
	19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03
	20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99
	21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96
	22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94
	23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91
	24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89
	25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	

FUENTE: LIND, Douglas. Marchal, William. Wathen, Samuel. Estadística aplicada a los negocios y la economía. Mc. Graw-Hill, México, 2008. p. 788.

ANEXO V

Tabla V.1. Determinación de la Densidad API corregida a 60°F. Biodiesel La Fabril

TABLE 5B. GENERALIZED PRODUCTS API CORRECTION TO 60 F												
TEMP. F	API GRAVITY AT OBSERVED TEMPERATURE CORRESPONDING API GRAVITY AT 60 F										TEMP. F	
	25.0	25.5	26.0	26.5	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5	30.0	
45.0	26.0	26.5	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5	30.0	30.5	31.1	45.0
45.5	25.9	26.5	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5	30.0	30.5	31.0	45.5
46.0	25.9	26.4	26.9	27.4	27.9	28.4	29.0	29.5	30.0	30.5	31.0	46.0
46.5	25.9	26.4	26.9	27.4	27.9	28.4	28.9	29.4	29.9	30.4	30.9	46.5
47.0	25.8	26.4	26.9	27.4	27.9	28.4	28.9	29.4	29.9	30.4	30.9	47.0
47.5	25.8	26.3	26.8	27.3	27.8	28.3	28.9	29.4	29.9	30.4	30.9	47.5
48.0	25.8	26.3	26.8	27.3	27.8	28.3	28.8	29.3	29.8	30.3	30.8	48.0
48.5	25.7	26.3	26.8	27.3	27.8	28.3	28.8	29.3	29.8	30.3	30.8	48.5
49.0	25.7	26.2	26.7	27.2	27.7	28.2	28.7	29.3	29.8	30.3	30.8	49.0
49.5	25.7	26.2	26.7	27.2	27.7	28.2	28.7	29.2	29.7	30.2	30.7	49.5
50.0	25.7	26.2	26.7	27.2	27.7	28.2	28.7	29.2	29.7	30.2	30.7	50.0
50.5	25.6	26.1	26.6	27.1	27.6	28.1	28.6	29.1	29.7	30.2	30.7	50.5
51.0	25.6	26.1	26.6	27.1	27.6	28.1	28.6	29.1	29.6	30.1	30.6	51.0
51.5	25.6	26.1	26.6	27.1	27.6	28.1	28.6	29.1	29.6	30.1	30.6	51.5
52.0	25.5	26.0	26.5	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.6	30.1	30.6	52.0
52.5	25.5	26.0	26.5	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5	30.0	30.5	52.5
53.0	25.5	26.0	26.5	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5	30.0	30.5	53.0
53.5	25.4	25.9	26.4	26.9	27.4	27.9	28.4	28.9	29.4	30.0	30.5	53.5
54.0	25.4	25.9	26.4	26.9	27.4	27.9	28.4	28.9	29.4	29.9	30.4	54.0
54.5	25.4	25.9	26.4	26.9	27.4	27.9	28.4	28.9	29.4	29.9	30.4	54.5
55.0	25.3	25.8	26.3	26.8	27.3	27.8	28.3	28.8	29.3	29.8	30.3	55.0
55.5	25.3	25.8	26.3	26.8	27.3	27.8	28.3	28.8	29.3	29.8	30.3	55.5
56.0	25.3	25.8	26.3	26.8	27.3	27.8	28.3	28.8	29.3	29.8	30.3	56.0
56.5	25.2	25.7	26.2	26.7	27.2	27.7	28.2	28.7	29.2	29.7	30.2	56.5
57.0	25.2	25.7	26.2	26.7	27.2	27.7	28.2	28.7	29.2	29.7	30.2	57.0
57.5	25.2	25.7	26.2	26.7	27.2	27.7	28.2	28.7	29.2	29.7	30.2	57.5
58.0	25.1	25.6	26.1	26.6	27.1	27.6	28.1	28.6	29.1	29.6	30.1	58.0
58.5	25.1	25.6	26.1	26.6	27.1	27.6	28.1	28.6	29.1	29.6	30.1	58.5
59.0	25.1	25.6	26.1	26.6	27.1	27.6	28.1	28.6	29.1	29.6	30.1	59.0
59.5	25.0	25.5	26.0	26.5	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5	30.0	59.5
60.0	25.0	25.5	26.0	26.5	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5	30.0	60.0

* DENOTES EXTRAPOLATED VALUE

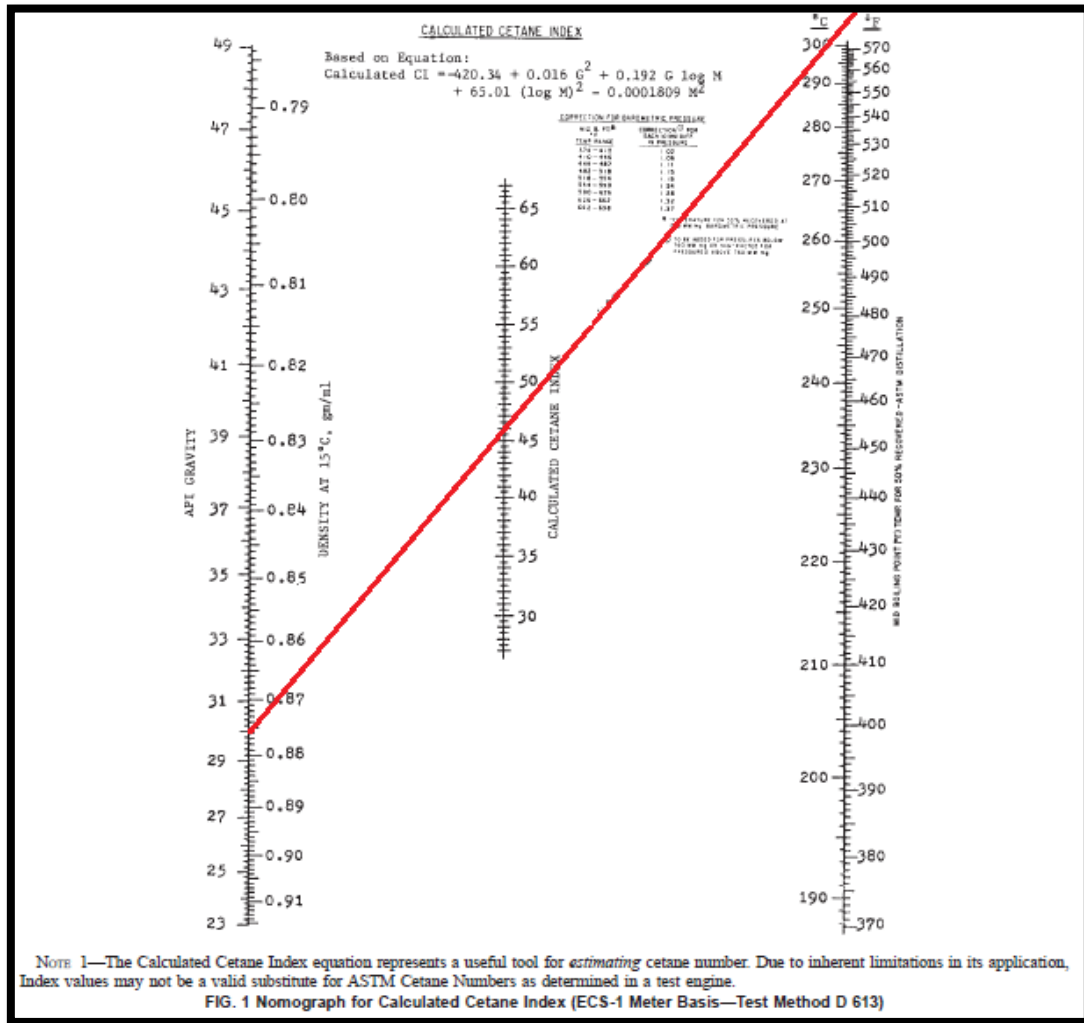
95

API GRAVITY = 25.0 TO 30.0

FUENTE: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), Petroleum measurement tables, Table 5B, Generalized products, Correction of Observed API Gravity to API Gravity at 60°F, Volume II, Washington, 2007. p. 95.

ANEXO W

Gráfico W.1. Determinación del Índice de Cetano. Biodiesel La Fabril



FUENTE: Norma ASTM D976. Índice de Cetano Calculado de combustibles destilados. p. 3.

ANEXO X

Resultados de los cálculos para la caracterización de las muestras

Tabla X.1. Resultados de los cálculos para la caracterización de las muestras DP, BLF, BPDR

ENSAYO	NORMA	CÁLCULOS	UNIDAD	BLF	BPDR	DP
Densidad a 15°C	ASTM D 287	T _{ob} , (°F)	°F	59	59	59
		y = °API 60°F	/	30	25.5	39.6
		sp _{60/60°F}	/	0.8762	0.9013	0.8270
		ρ _{59°F}	kg/m ³	875.31	900.40	826.20
Punto de inflamación	ASTM D 93	K	KPa	72.70	72.70	72.70
		PIc	°C	130.15	90.15	62.15
Contenido de agua	ASTM D 95	% V/m	%	0.0331	0.2997	/
		Av/m	ml/g	0.0003	0.0030	/
		Am/m	mg/kg	330.11	2991.13	/
Viscosidad cinemática	ASTM D 445	k	/	1.0009	1.0009	1.0009
		C ₂	cSt/s	0.0075	0.0075	0.0043
		v _{1,2}	cSt/s	1.9423	6.3523	2.6451
Número de Cetano	ASTM D 976	Cc	°C	15.15	15.15	13.32
		Tc	°C	331.18	330.15	257.32
		Tf	°F	628.12	626.27	495.18

Tabla X.1 (Continuación)

ENSAYO	NORMA	CÁLCULOS	UNIDAD	BLF	BPDR	DP
Número de Cetano	ASTM D 976	IC	/	47.77	41.31	52.97
		NC	/	48.56	39.71	56.35
Temperatura de ebullición al 90% de destilado	ASTM D 86	Cc	°C	15.33	15.38	15.02
		Tc	°C	337.33	339.38	325.02
Poder calórico	ASTM D 240	PCb	KJ/kg	/	/	43.0314
		PCn	KJ/kg	/	/	45.9157

Tabla X.2. Resultados de los cálculos para la caracterización de las mezclas diesel-biodiesel (La Fabril)

ENSAYO	NORMA	CÁLCULOS	UNIDADES	B2LF	B5LF	B8LF	B10LF	B15LF
Densidad a 15°C	ASTM D 287	T _{ob} , (°F)	°F	59	59	59	59	59
		y = °API 60°F	/	37.9	37.7	37.5	37.3	36.9
		sp _{60/60°F}	/	0.8353	0.8363	0.8373	0.8383	0.8403
		ρ _{59°F}	kg/m ³	834.4944	835.4808	836.4695	837.4606	839.4498
Punto de inflamación	ASTM D 93	K	Kpa	72.77	72.77	72.77	72.77	72.77
		PIc	°C	63.13	65.13	67.13	68.13	72.13
Viscosidad cinemática	ASTM D 445	k	/	1.0009	1.0009	1.0009	1.0009	1.0009
		C ₂	cSt/s	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043
		v _{1,2}	cSt/s	2.86	2.90	2.97	3.01	3.16
Número de Cetano	ASTM D 976	Cc	°C	13.56	13.60	13.53	13.63	13.68
		Tc	°C	268.55	270.60	267.53	271.63	273.68
		Tf	°F	515.39	519.09	513.55	520.93	524.63
		IC	/	52.52	52.60	51.61	52.12	51.84
		NC	/	55.66	55.78	54.26	55.04	54.62

Tabla X.2 (Continuación)

ENSAYO	NORMA	CÁLCULOS	UNIDADES	B2LF	B5LF	B8LF	B10LF	B15LF
Temperatura de ebullición al 90% de destilado	ASTM D 86	Cc	°C	15.09	15.09	15.04	15.04	14.91
		Tc	°C	330.09	330.09	328.04	328.04	322.91

Tabla X.3. Resultados de los cálculos para la caracterización de las mezclas diesel-biodiesel (Palmar del Río)

ENSAYO	NORMA	CÁLCULOS	UNIDADES	B2PDR	B5PDR	B8PDR	B10PDR	B15PDR
Densidad a 15°C	ASTM D 287	T ob, (°F)	°F	59	59	59	59	59
		y = °API 60°F	/	39.4	38.9	38.6	38.2	37.4
		sp 60/60°F	/	0.8280	0.8304	0.8319	0.8338	0.8378
		ρ 59°F	kg/m ³	827.1700	829.5971	831.0603	833.0192	836.9648
Punto de inflamación	ASTM D 93	K	Kpa	72.77	72.77	72.77	72.77	72.77
		PIc	°C	62.13	63.13	64.13	65.13	66.13
Viscosidad cinemática	ASTM D 445	k	/	1.0009	1.0009	1.0009	1.0009	1.0009
		C ₂	cSt/s	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043
		v _{1,2}	cSt/s	2.29	2.35	2.53	2.68	2.93
Número de Cetano	ASTM D 976	Cc	°C	13.12	13.32	13.30	13.22	13.50
		Tc	°C	251.12	259.32	258.30	255.22	266.50
		Tf	°F	484.01	498.78	496.93	491.39	511.70
		IC	/	51.05	52.21	51.43	49.99	51.22
		NC	/	53.41	55.17	53.99	51.81	53.67
Temperatura de ebullición al 90% de destilado	ASTM D 86	Cc	°C	15.22	15.04	15.01	15.01	14.89
		Tc	°C	335.22	328.04	327.02	327.02	321.89

ANEXO Y

Representación comparativa de las diferentes propiedades con respecto a las distintas muestras analizadas

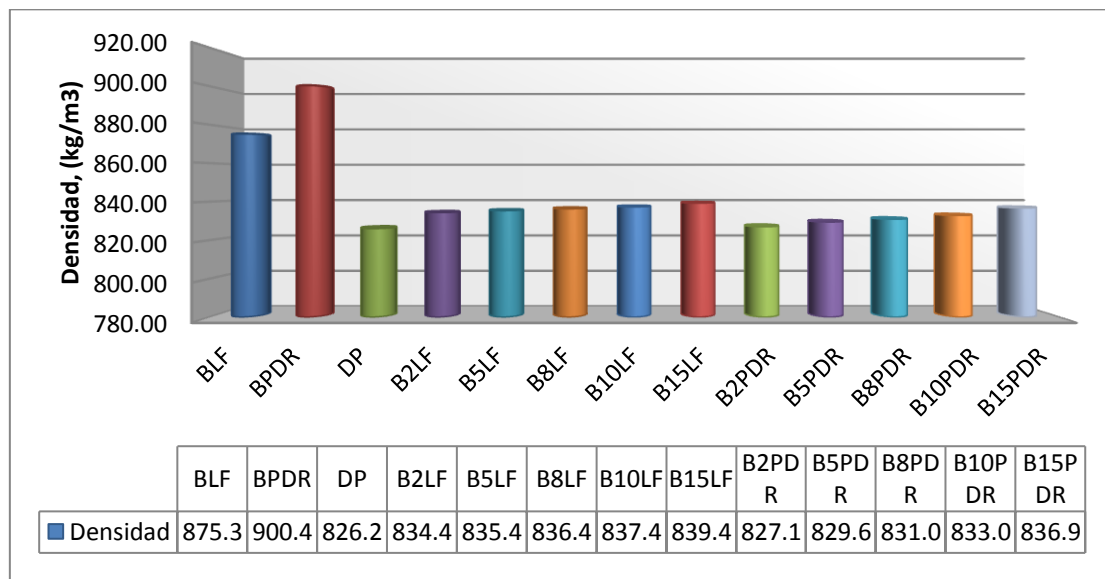


Gráfico Y.1. Densidad = f (Muestra)

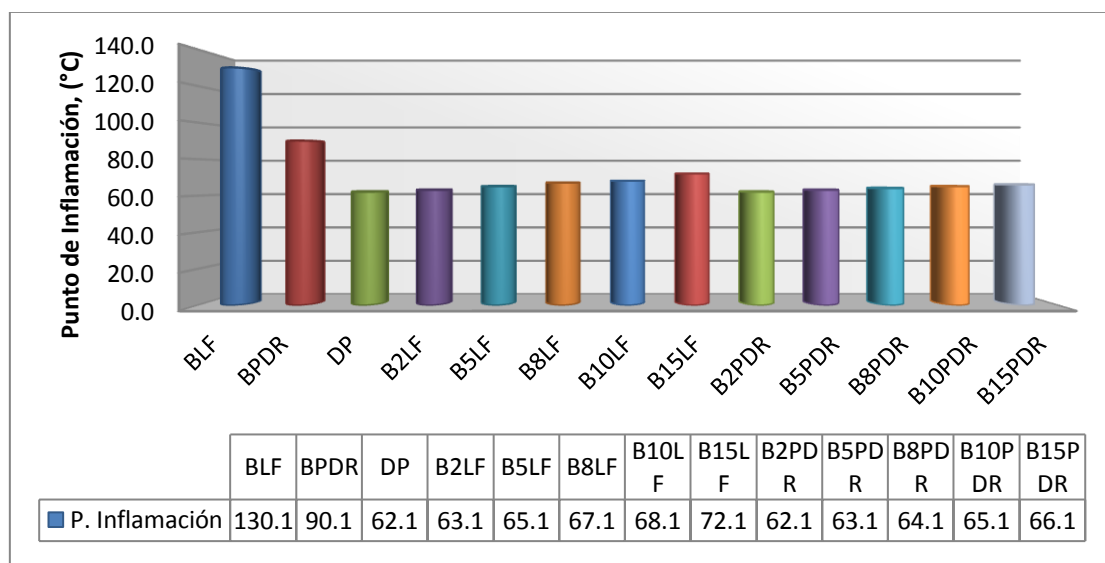


Gráfico Y.2. Punto de Inflamación = f (Muestra)

ANEXO Y (Continuación)

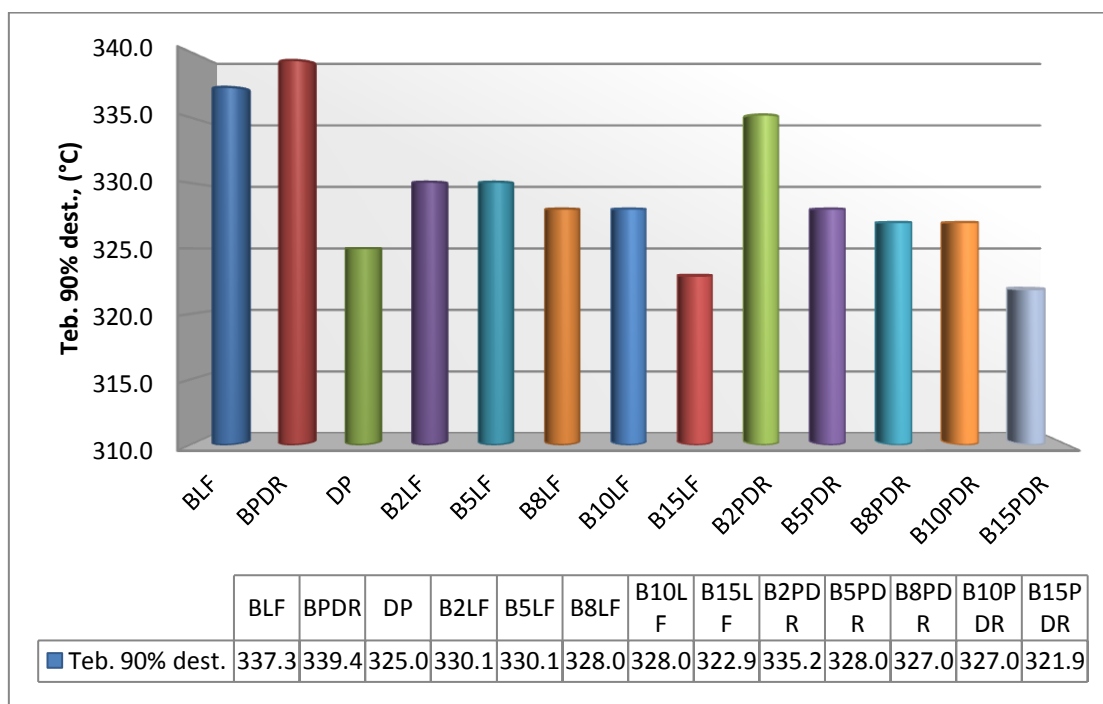


Gráfico Y.3. Temperatura de ebullición al 90% de destilado = f (Muestra)

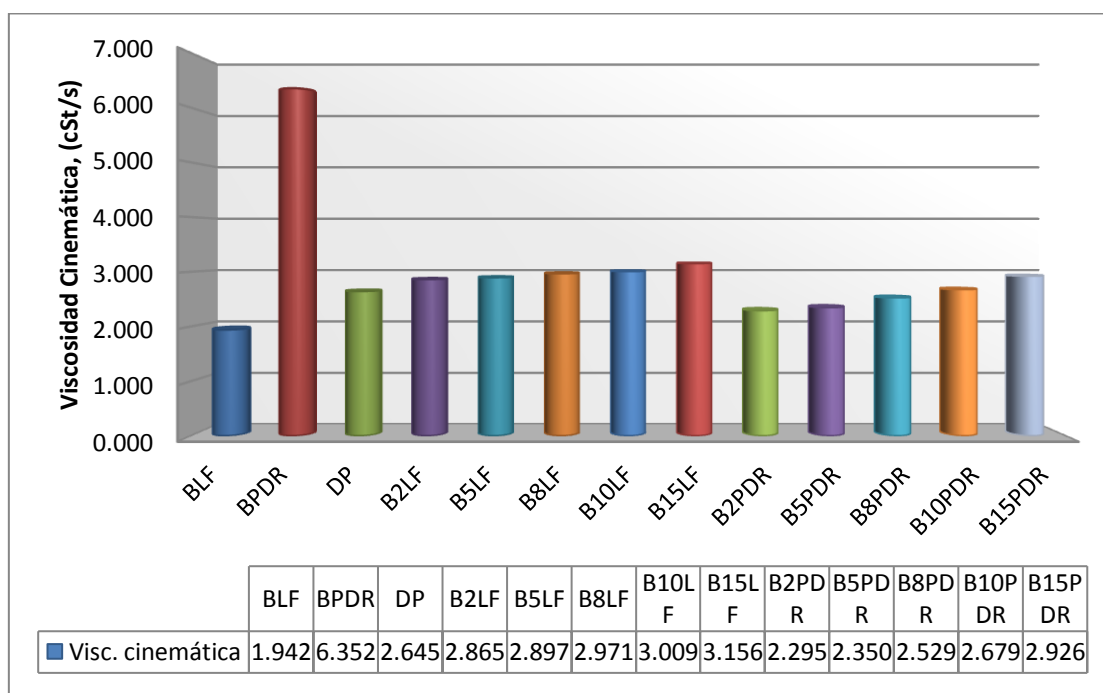


Gráfico Y.4. Viscosidad cinemática = f (Muestra)

ANEXO Y (Continuación)

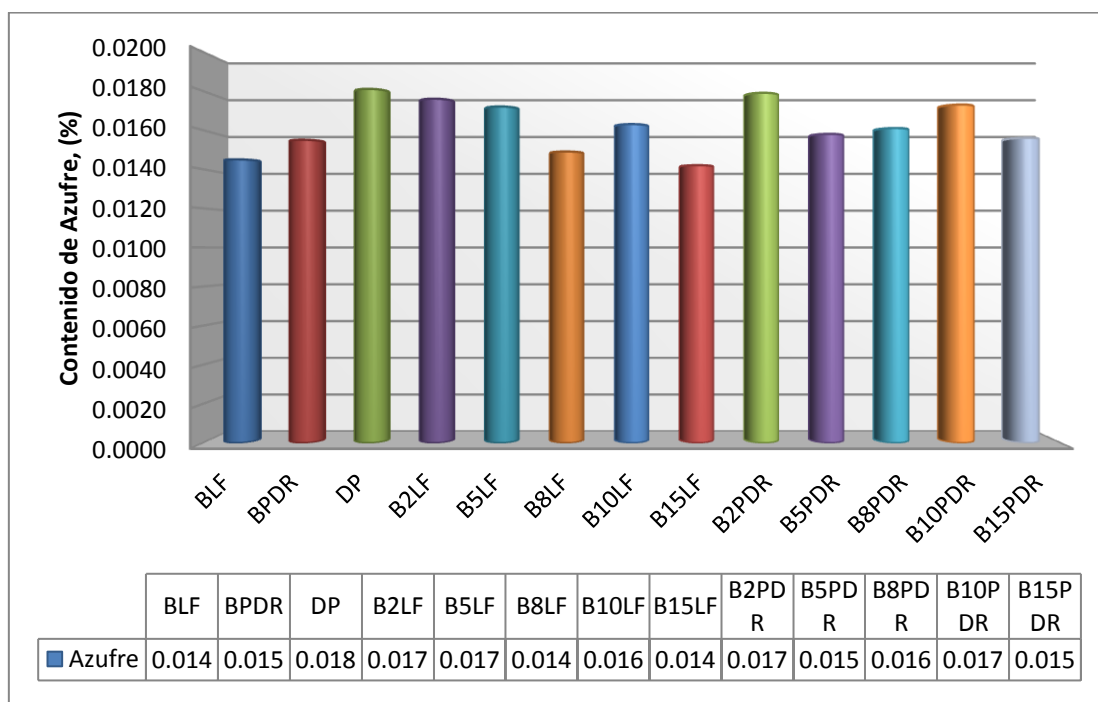


Gráfico Y.5. Contenido de Azufre = f (Muestra)

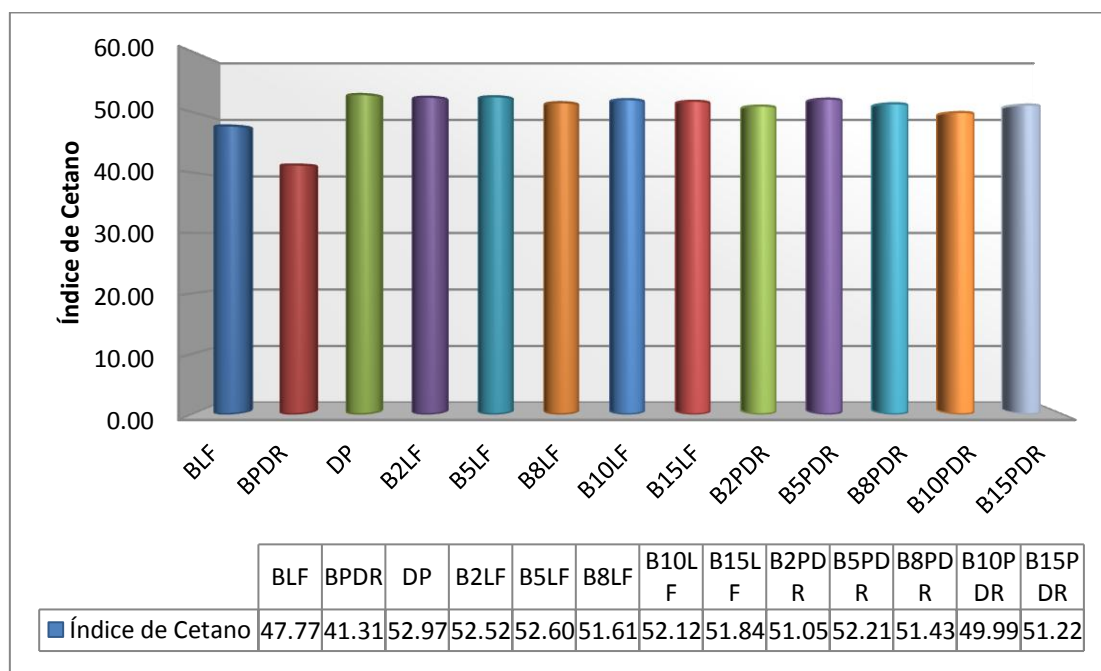


Gráfico Y.6. Índice de Cetano = f (Muestra)

ANEXO Y (Continuación)

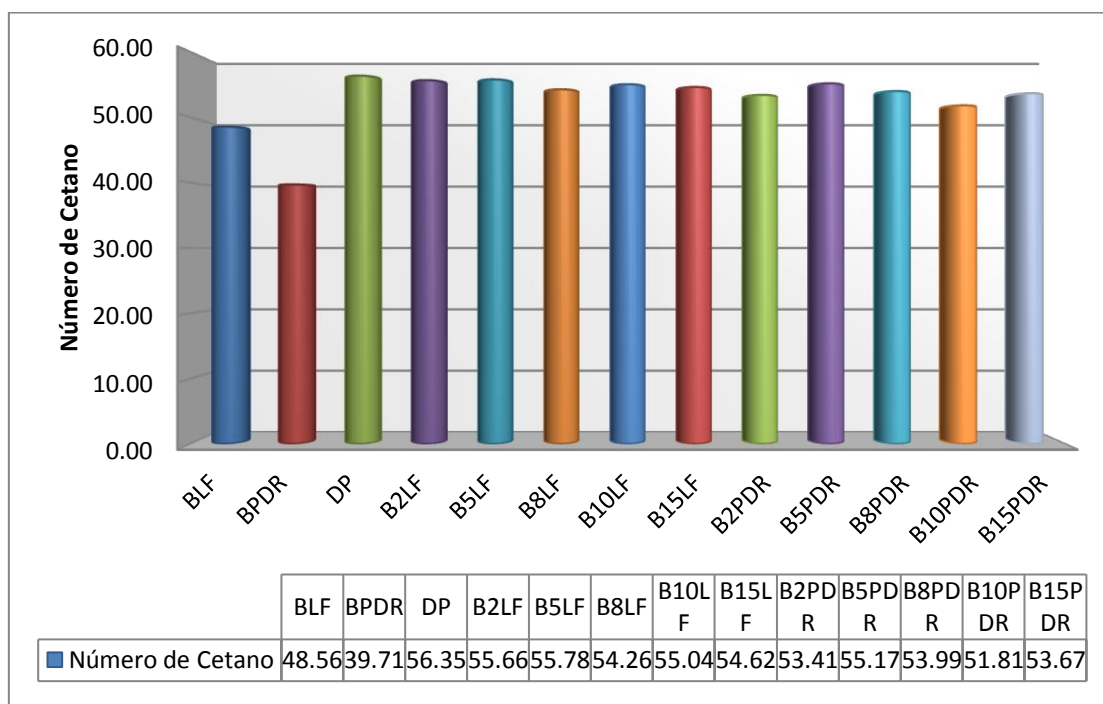


Gráfico Y.7. Número de Cetano = f (Muestra)

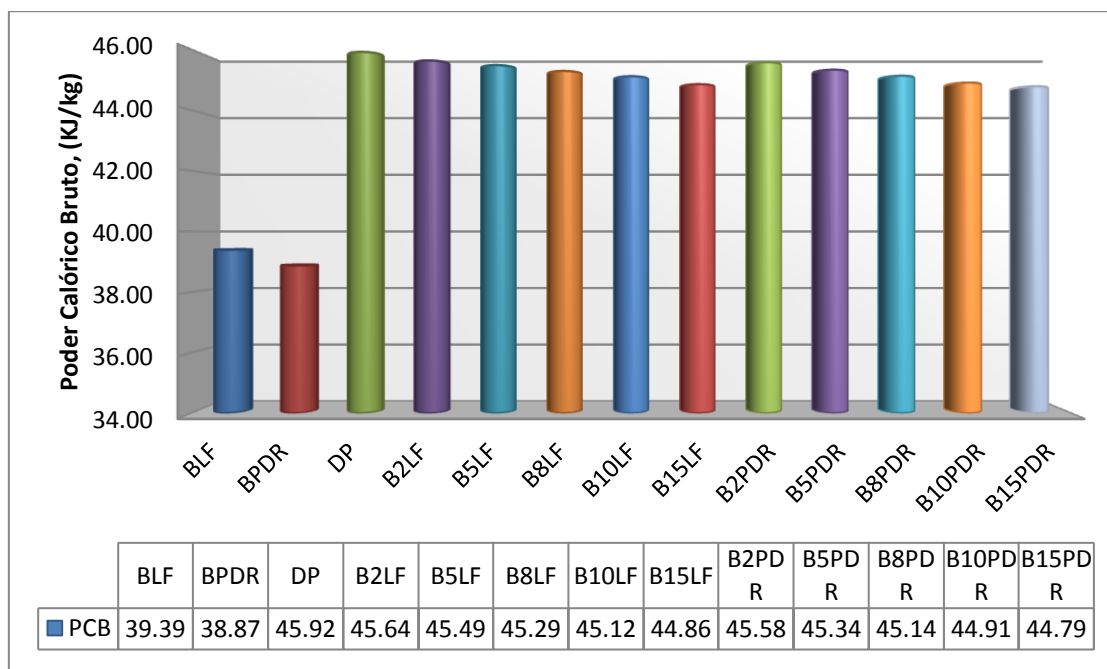


Gráfico Y.8. Poder Calórico = f (Muestra)